

电力电子、电机控制系统的建模和仿真

DIANLI DIANZI、DIANJI KONGZHI XITONG DE JIANMO HE FANGZHEN

洪乃刚 编著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电力电子、电机控制系统的建模和仿真

洪乃刚　编著



机 械 工 业 出 版 社

本书以 MATLAB 为基础，介绍了 MATLAB 电气系统模型库模块及其功能，并以实例介绍了电力电子和电机控制系统的建模和仿真方法，内容包括 AC/DC、DC/DC、DC/AC、AC/AC 的各种变换电路，直流调速系统和交流调速系统等。为了适应现代数字化控制系统的发展，本书在连续系统的建模仿真外，还介绍了采样离散系统的建模和仿真方法。

本书附有仿真模型光盘，最大限度地为读者学习提供了方便。

本书可用于高等学校电类专业的选修课教材，也可供研究生和技术研究人员参考和使用。

图书在版编目（CIP）数据

电力电子、电机控制系统的建模和仿真/洪乃刚编著. --北京：机械工业出版社，2010.1

ISBN 978-7-111-29137-4

Ⅰ. 电… Ⅱ. 洪… Ⅲ. ①电力电子学-系统建模②电力电子学-计算机仿真③电机-控制系统-系统建模④电机-控制系统-计算机仿真 Ⅳ. TM1-39 TM301.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 217081 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：林春泉 责任编辑：赵玲丽 版式设计：张世琴

封面设计：鞠 杨 责任校对：陈立辉 责任印制：洪汉军

北京市朝阳展望印刷厂印刷

2010 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 17 印张 · 415 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-29137-4

ISBN 978-7-89451-416-5（光盘）

定价：33.00（含 1CD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

社服务中心：（010）88361066

销 售 一 部：（010）68326294

销 售 二 部：（010）88379649

读者服务部：（010）68993821

网络服务

门户网：http://www.cmpbook.com

教材网：http://www.cmpedu.com

前　　言

电力电子和电力拖动控制系统的仿真越来越受到业内各方面人士的关注，它不仅是教学和学习的重要手段和工具，在研究及工程设计中也发挥了越来越重要的作用。用仿真来代替实际系统的试验，在计算机上研究和设计系统，这不仅省时、省力，降低成本和缩短研发周期，并且还可以获得更丰富、详细的数据资料。仿真就是要讲究“真”，使在计算机上建立的模型能完全反映实际的物理系统，随着众多学者卓绝的工作和现代计算机性能的提高，这一目标已经可以实现。2006年作者出版了《电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真》，在这几年中MATLAB发生了很大变化，模型库更新的速度很快，电力电子系统的仿真功能愈来愈强，几乎各种复杂的电力电子电路和交直流调速系统都可以通过仿真来研究，作者也做了一些新的工作，在这基础上撰写了本书，书中的模型也按新版MATLAB做了更新。

《电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真》一书的模型是在MATLAB 6.1版本基础上做的，现在显然是不够了，在MATLAB6.5版本以上，原有的模型可能打不开，或者打开后不能运行，这是因为新旧power system器件模型库有很大变化，其中主要的变化是老版本中power system模块都使用SIMULINK的信号接口，而MATLAB 6.5版本以后的电路元器件模块改用了电路接口，这使原来在低版本上做的模型在新版本上不能直接使用，需要用“psbupdate”命令转换，并且转换后的模型还需要进行调整，即高版本对低版本不完全兼容，带来了使用上的不方便，这也是需要重写本书的原因之一，本书在MATLAB 7.1版本上完成。

现在电力电子和电力拖动的控制都是微机和数字化的，因此本书在连续系统的仿真外增加了采样离散系统的仿真。在MATLAB 7.0版本之后，Simpower system增加了一个Application Libraries模型库，库中包含了常见的各种直流和交流调速系统模块，模型采用了采样和离散控制，本书选择其中一些主要的模块进行了介绍和剖析，为读者研究微机控制的数字化系统提供范例。

《电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真》出版后，许多读者反映按照书中介绍所构建的模型在运行时仍有困难，这往往是模块参数设置的问题，参数设置对模型很重要，考虑到这一点，作者在本书中提供了参考的参数，但是因为电力电子电路的相似性，为了避免过多的重复，使内容显得很繁琐，在书中前面介绍过的内容在书后面再用到时就简略了，这使仅对某一模型感兴趣的读者感到不便，例如调节器是调速系统常用的模块，在直流调速系统中作了介绍，在交流系统中就不再重复。为了更好地促进电力电子系统的仿真研究和方便读者，本书附了一张光盘，提供了书中介绍的40余个仿真模型。模型在MATLAB7.1版本基础上制作，直接调用输入模块参数就可以运行，这是作者多年工作的积累，提供读者学习和研究使用，希望能起到抛砖引玉的作用。

本书由洪乃刚编著，研究生章晋武、董德智、谢达伟、丁文鹏、徐杰、汤代彬、王红然、蔡公华、郝隆等也参与了本书的编写，并为本书仿真模型做了大量工作，在此深表感谢。

《电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真》出版后收到众多读者来信，对读者的热烈响应表示衷心的感谢，对于一些读者的求助，因为学识和时间关系未能一一作答，在此也表示歉意，对于本书的不到之处，欢迎读者批评指正，联系邮箱 hongnaigang@ahut. edu. cn。

洪乃刚

2009 年 6 月

于安徽工业大学



目 录



第1章　MATLAB基础

1.1　MATLAB介绍

MATLAB是一种科学计算软件。MATLAB是Matrix Laboratory（矩阵实验室）的缩写，这是一种以矩阵为基础的交互式程序计算语言。早期的MATLAB主要用于解决科学和工程的复杂数学计算问题。由于它使用方便、输入便捷、运算高效、适应科技人员的思维方式，并且有绘图功能，有用户自行扩展的空间，特别受到用户的欢迎，使它成为在科技界广为使用的软件，也是国内外高校教学和科学研究的常用软件。

MATLAB由美国Mathworks公司于1984年开始推出，历经升级，到2001年已经有了6.0版，现在MATLAB 6.1、6.5、7.0版本都已相继面世。早期的MATLAB在DOS环境下运行，1990年推出了Windows版本。1993年，Mathworks公司又推出了MATLAB的微机版，充分支持在Microsoft Windows界面下的编程，它的功能越来越强大，在科技和工程界广为传播，是各种科学计算软件中使用频率较高的一种软件。

MATLAB比较易学，它只有一种数据类型（即64位双精度二进制），一种标准的输入输出语句，它用解释方式工作，不需要编译，一般入门后经过自学就可以掌握。如果有不清楚的地方，可以通过它的帮助（help）和演示（demo）功能得到启示。MATLAB学习的难点在于它有大量函数，这些MATLAB函数仅基本部分就有700多个，其中常用的就有200～300个，掌握和记忆比较困难。

1993年出现了SIMULINK，这是基于框图的仿真平台，SIMULINK挂接在MATLAB环境上，以MATLAB的强大计算功能为基础，以直观的模块框图进行仿真和计算。在SIMULINK环境中提供了各种仿真工具，尤其是它不断扩展的、内容丰富的模块库（SIMULINK Library Browser），为系统的仿真提供了极大便利。在SIMULINK平台上，拖拉和连接典型模块就可以绘制仿真对象的模型，并对模型进行仿真。在SIMULINK平台上，仿真模型的可读性很强，这就避免了在MATLAB窗口使用MATLAB命令和函数仿真时，需要记忆大量M函数的麻烦，对广大工程技术人员无疑是最好的福音。现在的MATLAB都同时捆绑了SIMULINK，SIMULINK的版本也在不断地升级，从1993年MATLAB 4.0/SIMULINK 1.0版到，2001年MATLAB 6.1/SIMULINK 4.1版，2002年推出从MATLAB 6.5/SIMULINK 5.0版本，2005年推出了MATLAB 7.1/SIMULINK 6.3版。本书仿真是在MATLAB 7.1/SIMULINK 6.3版的基础上进行，到本书出版时，MATLAB又有了更新的版本。现在MATLAB已经不是单纯的“矩阵实验室”，它已经是一个高级的计算和仿真平台。

SIMULINK原本是为控制系统的仿真而建立的工具箱Toolbox，在使用中，它很易编程、易拓展，并且可以解决一般难以解决的非线性、变系数等问题；它能支持连续系统和离散系统的仿真，支持连续离散混合系统的仿真，也支持线性和非线性系统的仿真，并且支持多种采样频率（Multirate）系统的仿真，也就是不同的系统能以不同的采样频率组合，这样就可

以仿真较大、较复杂的系统。因此，各学科领域根据自己的仿真需要，以 MATLAB 为基础，开发了大量的专用程序，并把这些程序以模块的形式都放入到 SIMULINK 中，形成了模块库 SIMULINK Library Browser。SIMULINK 的模块库实际上就是用 MATLAB 基本语句编写的子程序集，现在 SIMULINK 模块库有三级树状的子目录，在一级目录 SIMULINK 下，包含了最早开发的数学计算工具箱和控制系统工具箱的内容，以及之后开发的信号处理工具箱（DSP Blockset）、通信系统工具箱（Communication Blockset）等等也并行列入模块库的一级子目录，逐级打开模块库浏览器（SIMULINK Library Browser）的目录，就可以看到这些模型库中包含的模块。

从 SIMULINK 4.1 版开始有了电力系统模块库（Power System Blockset），该模块库主要是由加拿大 HydroQuebec 公司和 TECSIM International 公司共同开发的。在 SIMULINK 环境下用电力系统模型库的模块可以方便地进行 RLC 电路、电力电子电路、电机控制系统和电力系统的仿真。本书中电力电子和电力拖动控制系统的仿真就是在 MATLAB/SIMULINK 环境下，主要使用电力系统模块库 SimPower System Blockset 和 SIMULINK 进行的。通过电力电子电路和电机控制系统的仿真，不仅展示了 MATLAB/SIMULINK 的强大功能，并且学习了控制系统仿真的方法和技巧，可以深入地研究电路和系统的原理和性能。由于 SIMULINK 和 MATLAB 的密切依存关系，在介绍 SIMULINK 之前，必须首先介绍 MATLAB。MATLAB 的一些基本命令和函数，尤其是 MATLAB 的绘图功能，是电力电子和电力拖动控制系统仿真经常要使用的。但是，本书主要介绍电力电子和电力拖动控制系统的仿真，因此对 MATLAB 只介绍与本书有关的内容。MATLAB 功能强大，有关 MATLAB 的书籍已经很多，如果读者有对 MATLAB 更深入了解的要求，可以阅读其他有关 MATLAB 的书籍。

1.2 MATLAB 的安装和启动

MATLAB 光盘插入光驱后启动，如果操作系统是 Windows98 或 Windows2000 等，系统会自动地进入和运行安装程序，出现图 1-1 所示的 MATLAB 启动界面，并随后出现图 1-2 所示的安装对话框，按对话框的提示，按“Next”键即可完成 MATLAB 的安装。在安装过程中需要输入用户名称、公司及产品注册码等。在安装中可以选择安装组件，如果磁盘空间不足，可以减少一些暂时不用的组件。

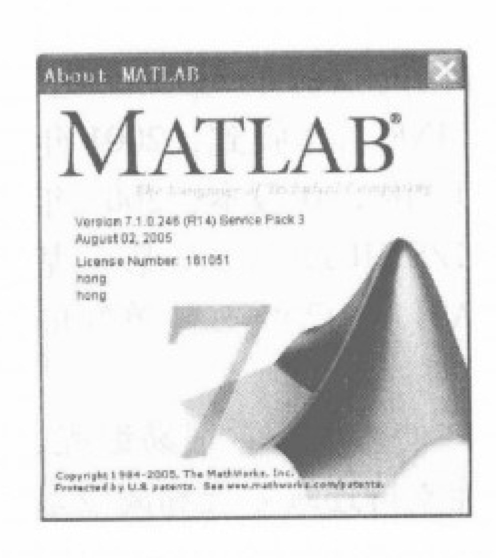


图 1-1　MATLAB 启动界面

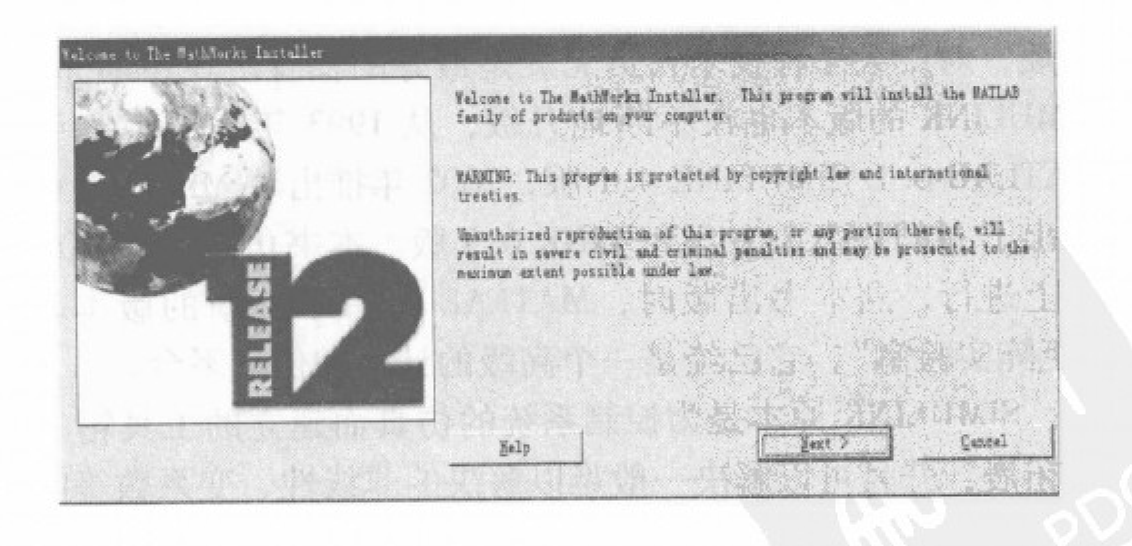


图 1-2　MATLAB 安装对话框

在MATLAB安装结束时，可以选择“立即重新启动计算机”或“暂不重新启动计算机”。安装完成后，在Windows桌面上会自动生成MATLAB快捷键图标。

不同MATLAB版本的安装过程会有不同，但大体是相同的。

1.3 MATLAB环境

在桌面上双击MATLAB快捷键图标或者在开始菜单里点击“MATLAB”的选项，即可进入MATLAB环境。进入MATLAB环境，即打开了MATLAB窗口（见图1-3）。环境包括MATLAB标题栏、主菜单栏和常用工具栏。在默认显示状态时，在工具栏下有三个子窗口，左边上方窗口显示MATLAB联机说明书目录或工作间的内容，两者可以通过子窗口下方的“Current Directory”和“Workspace”键切换。左边下方窗口显示已执行的命令（Command History）。右方窗口是MATLAB的命令子窗口，这是MATLAB的主要工作窗口，在这个窗口中，在提示符“》”后逐行输入MATLAB命令，按回车键后命令就能立即得到执行。

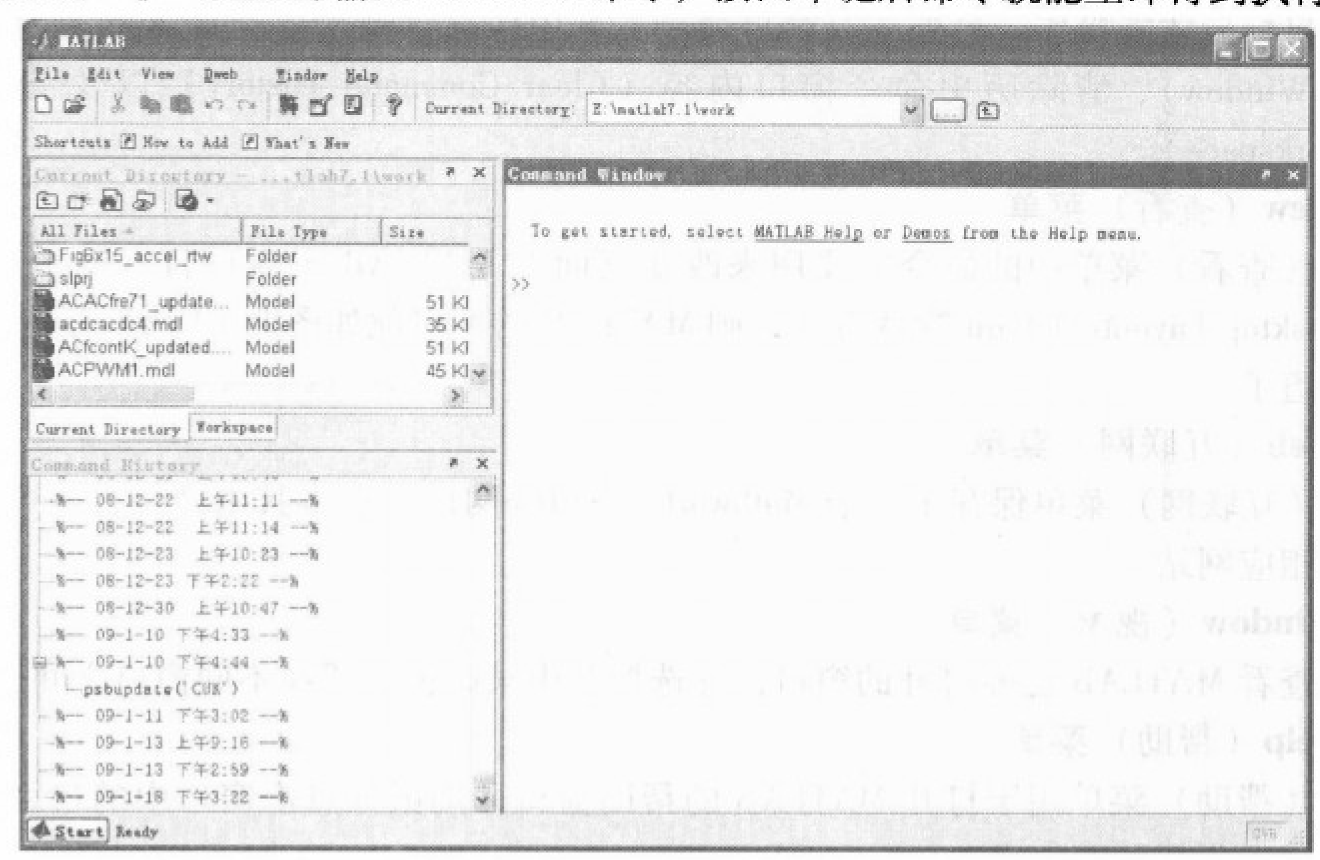


图1-3 MATLAB的工作环境

1.3.1 MATLAB的主菜单

MATLAB的主菜单有File、Edit、View、Web、Window和Help 6项。点击菜单命令，就会显示下拉子菜单的内容。这些菜单的内容与其他应用程序的菜单区别不大，因此下面只选择一些主要的来说明。

1. File（文件）菜单

1）“New”：创建一个新文件，有多种文件“M-file”、“Figure”、“Model”等可选。选择“Model”即可进入Simulink环境，以绘制仿真模型方式对电路和系统仿真，这是本书的主要仿真方式。

2）“Open”：打开一个名为“work”的文件夹，这是MATLAB默认的保存文件的地方。

只要文件保存时没有另外指定文件保存的路径，MATLAB 系统就将文件保存在“work”文件夹中。

3）“Close Commmand Window”：点击该项可以切换窗口显示。

4）“Import Data”：打开 MATLAB/work 文件夹中带 . mat 后缀的数据文件，并将数据放到工作间（Workspace）中备用。

5）“Save workspace As…”：保存工作间（workspace）中的数据。

6）“Set Path…”：打开 MATLAB 的路径浏览器，搜索 MATLAB 所有文件的路径。

7）“Preferences…”：可以打开一个 MATLAB 的参数设置对话框，供用户改变工作环境的外观和相关操作的属性。

8）“Print…”：打印。

2. Edit（编辑）菜单

Edit（编辑）菜单中包括了撤销（Undo）、恢复（Redo）、剪切（Cut）、复制（Copy）、粘贴（Paste）、（Paste Special…）、全选（Select All）、消除（Delete）等命令，这些命令都要在选中目标后才能操作。另外还有窗口命令，其中包括清除命令窗口显示的内容（Clear Command Window）、清除历史命令窗口内容（Clear Command History）以及清空工作间（Clear Workspace）。

3. View（查看）菜单

View（查看）菜单中的命令主要用来改变桌面上 MATLAB 子窗口打开的个数和排列，如选择 Desktop Layout/Default 默认方式，则 MATLAB 的窗口就如图 1-3 所示，读者只要试验几次就知道了。

4. Web（互联网）菜单

Web（互联网）菜单保存了三个 Mathworks 公司的网址，点击其中之一，即可联网进入该公司的相应网站。

5. Window（视窗）菜单

用来查看 MATLAB 已经打开的窗口，并选择其中某一窗口或在不同窗口之间进行切换。

6. Help（帮助）菜单

Help（帮助）菜单用于打开 MATLAB 的帮助窗口，用鼠标点击窗口中的帮助主题或浏览器，可以得到帮助的内容。

1.3.2　MATLAB 的工具栏

在 MATLAB 的工具栏上有 9 个主要按钮，为用户提供了常用命令的快捷方式，其功能如下：

1）用于打开 MATLAB 的 M 文件（M-file）编辑器，用编辑器编辑一个 M-file 新文件。

2）用于打开一个已经存在的文件，它的默认方式是打开 MATLAB 中文件夹 work 中的模型文件。

3）用于将选中的文档剪切下来，并放到粘贴板上。

4）用于复制选定的文档，放到粘贴板上备用。

5）用于将保存在粘贴板上的文档粘贴到指定的位置上。

6） 用于撤销最近的一次操作。

7） 用于恢复最近的一次操作。

8） 用于打开 SIMULINK 模块库浏览器，进入 SIMULINK 仿真环境。

9） 用于打开 MATLAB 帮助文件。

1.3.3 MATLAB 的命令窗口（Command Window）

MATLAB 命令窗口有一行提示“To get started, select MATLAB Help or Demos from the Help menu”，点击词“MATLAB Help”，可以打开 MATLAB 手册，点击“Demos”，可以打开 MATLAB 的仿真举例，从而获得帮助。

MATLAB 的命令窗口是 MATLAB 的主要工作区，是人机对话的主要环境。在命令窗口键入各种命令，可以得到相应的结果。如图 1-4 所示在命令窗口中键入了一个简单的代数算式：$10.5+3\times4(2.1+3.4)/2$，按回车键后得到计算结果是 43.5。关于 MATLAB 的命令和基本运算，将在后面作相应的介绍。

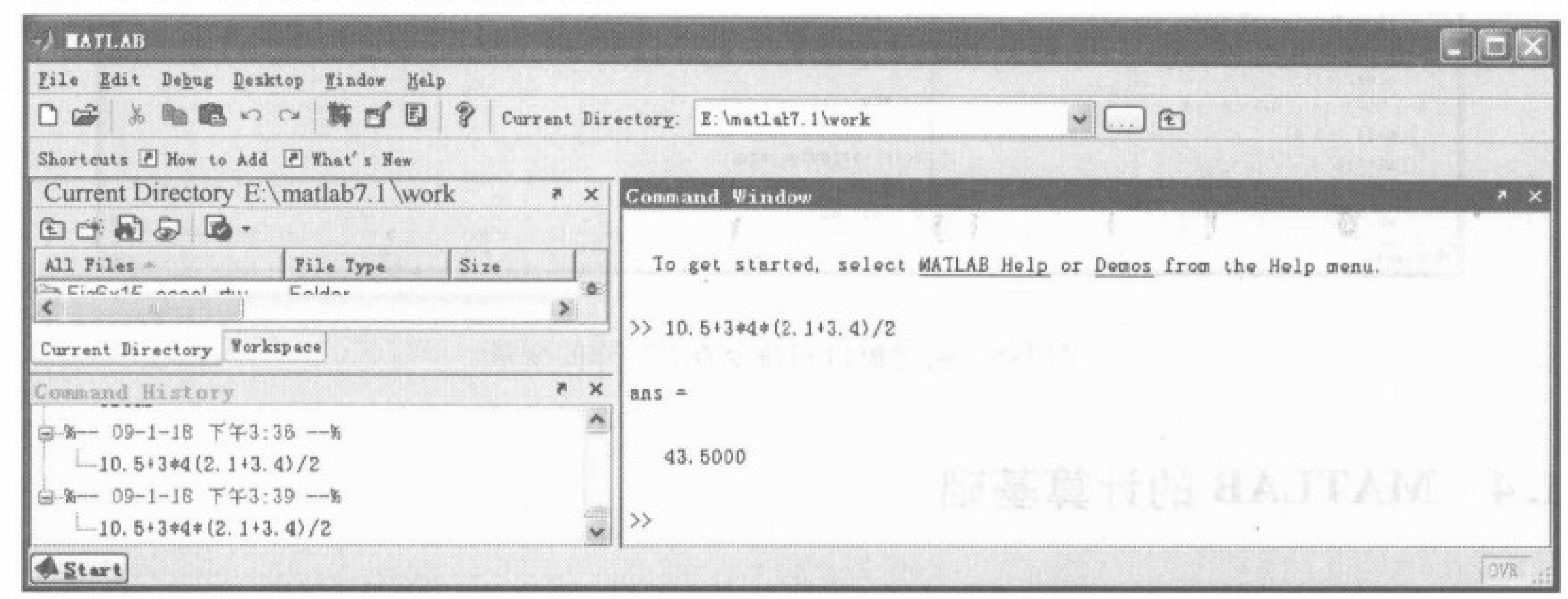


图 1-4 MATLAB 命令窗口

1.3.4 MATLAB 的工作间（Workspace）

MATLAB 的工作间（Workspace）是暂时存放 MATLAB 命令或程序的运行结果以及程序（或命令）中出现的常数和变量的一个空间。在进入 MATLAB 环境时，MATLAB 工作间（Workspace）就自动同时打开。在运行 MATLAB 程序时，程序中的变量就会存放到工作间中，程序运行的结果也以变量的形式保存在工作间中。

工作间的变量可以在窗口中看到，也可以用命令“who”或“whos”查看当前工作间中的所有变量。其中“Who”命令只给出变量名，“whos”命令不仅给出变量名，还同时给出变量的大小和数据类型。用命令“clear”可以删除清空工作间中的变量和数据。如图 1-5 所示，右边窗口给 A、A1、A2 三个变量赋值，最后用“who”命令查看了工作间的变量。将左上窗口切换到“workspace”，通过此窗口可以显示工作间的变量及变量的大小和类型。在左下窗口则给出了在命令窗口已经执行过的历史命令。

工作间中的变量和数据可以用“File”菜单中的“Save workspace As …”命令保存。

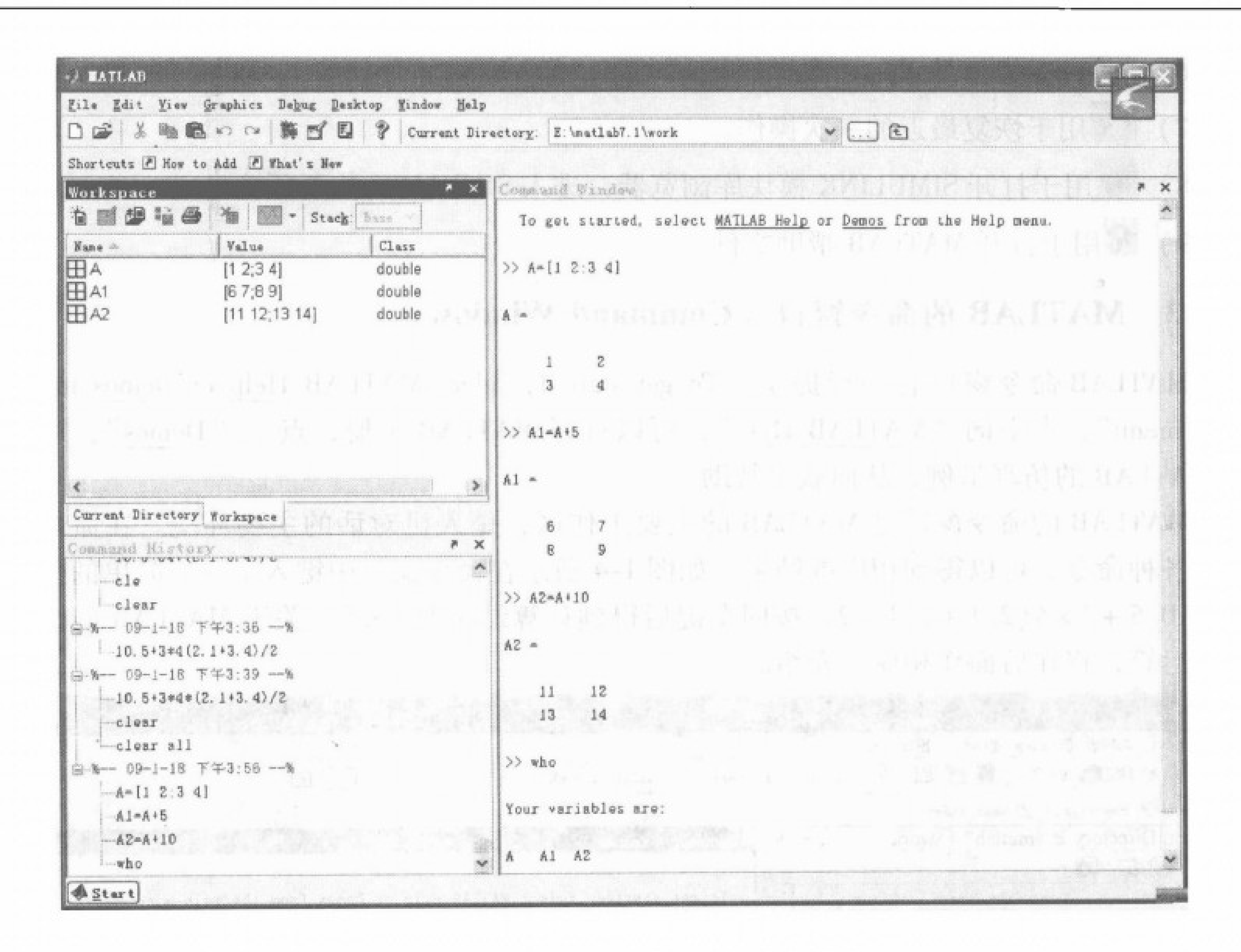


图 1-5 通过窗口和命令查看工作间变量

1.4 MATLAB 的计算基础

MATLAB 的计算主要是数组和矩阵的计算，并且定义的数值元素是复数，这是 MATLAB 的重要特点。函数是计算中必不可少的，MATLAB 函数的变量不需要事先定义，它已在命令语句中首次出现而自然定义，这在使用中很方便。使用 MATLAB/SIMULINK 仿真，MATLAB 的计算大部分已经模块化了，但是掌握一些必要的计算知识和定义还是很必要的。

1.4.1 常量和变量

MATLAB 数值计算的数据有常量和变量两种，变量和常量都可以用标识符来表示和辨别，这些标识符也就是变量名，变量在数值计算前必须首先赋值。

（1）常量 MATLAB 的常量有实数和复数两类，复数又有实部和虚部两部分，MATLAB 定义的数值元素是复数，因此实数是复数虚部为零的特殊情况。常量可以是十进制数，也可以用其他数制表示。

在 MATLAB 中，虚数的单位为“i”（$\mathrm{i}=\sqrt{-1}$），复数的生成语句为：

$z=a+b\mathrm{i}$

式中，a、b 为实数；z 为复数名。

或

$z = r * \exp(\theta * i)$

式中，r 为复数的模；θ 为复数的复角（弧度）。

MATLAB 常数的存储格式是 16 位长型格式，数值的有效范围是 $10^{-308} \sim 10^{+308}$。

（2）变量 MATLAB 变量的命名规则是：

1）变量名以英文字母开始，即首字符必须是英文 26 个字母之一。

2）变量名可以由英文字母、数字和下划线组成，MATLAB 能区分字母的大小写。

3）变量名长度不超过 31 个字符长度。

4）如果在变量名前添加了关键词“global”，该变量就成为全局变量，全局变量不仅在主程序中起作用，在调用的子程序和函数中也起作用。定义全局变量必须在主程序的首行，这是一般惯例。

MATLAB 有一些规定的常量和变量，这些常量和变量见表 1-1。

表 1-1 MATLAB 规定的常量和变量

常量和变量名	说　明
ANS(或 ans)	默认变量名,用于应答最近一次的操作、运算结果
i 或 j	虚数单位
pi	圆周率 π
eps	浮点数的相对误差
realmax	最大的实正数
realmin	最小的实正数
INF(或 inf)	无穷大
NaN(或 nan)	表示不定值(即 0/0)
nargin	函数实际输入的参数个数
nargout	函数实际输出的参数个数

1.4.2 数组、矩阵的表示和赋值

数组是指按一定次序排列的数，矩阵是由 $m \times n$ 个数，按 m 行和 n 列排列而成的“表”。数组可以是一维的，也可以是 n 维的，因此一维数组可以看成是一行多列的矩阵，是矩阵的特殊情况，一般也称为行向量，而一列多行的矩阵称为列向量，n 维数组一般也就是矩阵了。单个的数或标量可以看成是 1×1 的矩阵，所以数、数组都可以用矩阵表示，MATLAB 也以矩阵作为运算的基本单元。MATLAB 既支持数组的运算也支持矩阵的运算，但是数组与矩阵的运算有很大的不同，数组的运算对数组中每个元素都执行相同的操作，而矩阵的运算则按线性代数的法则进行。

（1）一维数组的表示和赋值 一维数组（行向量）是用方括号括起的一组元素（或数），元素之间用空格或逗号分隔，组成数组的元素可以是具体的数值、变量名或算式。举例如下：

```
x = [1 2 3 4 5 6]
```

x 为数组名，1、2、3、4、5、6 为组成数组的元素，元素之间以空格分隔。

```
y = [7,8,9,1 +2i,3 +4i]
```

数组元素包含复数，元素间以逗号分隔。

z=[1,2,3,a,b,c]
包含变量的数组，a、b、c 为变量名。

p=[pi,2 *pi,1.3 *sqrt(3),(1 +2)/5 *4]
以算式表示的数组。

(2) *n* 维数组、矩阵的表示和赋值　*n* 维数组或矩阵的表示和赋值的规则是矩阵或数组的元素列入方括号〔〕中：每行的元素间用空格或逗号分隔，行与行之间用分号或回车键隔开。如

A=[1 2 3;4 5 6;7 8 9]
A 为矩阵名，方括号内表示一个 3×3 的矩阵。

矩阵内的元素可以是数值、变量或者表达式。如

B=[1,2, 3;a, b (a+b)/2]

1.4.3 MATLAB 的算术运算

MATLAB 的算术运算符见表 1-2。

表 1-2　MATLAB 的算术运算符

算术运算符	说明	算术运算符	说明
+	加	\	矩阵左除
-	减	.\	数组左除
*	矩阵乘	/	矩阵右除
.*	数组乘	./	数组右除
^	矩阵乘方	'	矩阵转置
.^	数组乘方	.'	数组转置

1.4.4 MATLAB 的关系运算

所谓关系运算是指两个元素之间的比较，关系运算的结果只可能是 0 或 1。0 表示该关系式不成立，即为“假”；1 表示该关系式成立，即为“真”。MATLAB 的关系运算有 6 种，见表 1-3。

表 1-3　MATLAB 的关系运算符

关系运算符	说　明	关系运算符	说　明
==	等于	<	小于
~=	不等于	>=	大于等于
>	大于	<=	小于等于

1.4.5 MATLAB 的逻辑运算

逻辑量只有0（假）和1（真）两个值，逻辑量的基本运算有：与（&）、或（|）和非（~）三种。有时也包括异或运算（xor），异或运算可以通过三种基本运算组合而成。基本逻辑运算的真值见表 1-4。

表 1-4　基本逻辑运算的真值表

逻辑运算	A = 0		A = 1	
	B = 0	B = 1	B = 0	B = 1
A&B	0	0	0	1
A|B	0	1	1	1
~A	1	1	0	0
xor(A,B)	0	1	1	0

1.4.6　MATLAB 的特殊运算符

MATLAB 有一些特殊运算符在命令和计算中使用，这些特殊运算符见表 1-5。要指出的是，这些特殊运算符在英文状态下输入有效，在中文状态下输入则无效。

表 1-5　MATLAB 的特殊运算符

特殊运算符	说　明
:	冒号，输入行向量，从向量、数组、矩阵中取指定元素、行和列，大矩阵中取小矩阵
;	分号，用于分隔行
,	逗号，用于分隔列
()	圆括号，用于表示数学运算中的先后次序
[ ]	方括号，用于构成向量和矩阵
{ }	大括号，用于构成单元数组
.	小数点或域访问符
..	父目录
…	用于语句末端，表示该行未结束
%	用于注释
!	用于调用操作系统命令
=	用于赋值

1.4.7　MATLAB 常用的函数

MATLAB 的函数极为丰富，这里仅列举一些常用的数学函数（见表 1-6）

表 1-6　常用的数学函数

分类	函数	说明	分类	函数	说明
三角函数	sin	正弦	三角函数	sec	正割
	cos	余弦		csc	余割
	tan	正切		cot	余切
	asin	反正弦		asec	反正割
	acos	反余弦		acsc	反余割
	atan	反正切		acot	反余切
	atan2(x,y)	4 象限反正切		sech	双曲正割
	sinh	双曲正弦		csch	双曲余割
	cosh	双曲余弦		coth	双曲余切
	tanh	双曲正切		asech	反双曲正割
	asinh	反双曲正弦		acsch	反双曲余割
	acosh	反双曲余弦		acoth	反双曲余切
	atanh	反双曲正切			

（续）

分类	函数	说明	分类	函数	说明
指数函数	exp	以 e 为底的指数	复数	conj	求共轭复数
	log	自然对数		isreal	是实数时为真
	log2	以 2 为底的对数		unwrap	去掉相角突变
	log10	以 10 为底的对数		cplxpair	安共轭复数对排序
	pow2	2 的幂	取整函数	round	四舍五入取整数
	sqrt	求方根		fix	向 0 方向取整数
	Nextpow2	求比输入数大而最近 2 的幂		floor	向 - ∞ 方向取整数
复数	abs	求绝对值和复数模		ceil	向 + ∞ 方向取整数
	angle	求相角		sign	符号函数
	real	实部		rem(a,b)	A 整除 b,求余数
	imag	虚部		mod(x,m)	X 整除 m,取正余数

1.5 MATLAB 程序设计基础

MATLAB 是一种解释性高级程序设计语言，对程序中的语言边解释边执行。MATLAB 与其他高级语言一样，是由顺序、选择和循环三种基本控制结构组成。MATLAB 语句有表达语句、控制语句、调试语句和空语句等。控制语句还包括条件、循环和一些转移语句。MATLAB 的语句键入后按回车键即可执行，因此一般也把语句称为命令。

MATLAB 程序的基本结构如下：

```
%   说明
清除命令
定义变量
逐行执行的命令
…   …
    循环和转移
    逐行执行的命令
    …   …
    end
逐行执行的命令
…   …
```

1.5.1 表达式、表达式语句和赋值语句

1. 表达式

由运算符连接的常量、变量和函数就构成了 MATLAB 的表达式，因此在 MATLAB 中有算术表达式、函数表达式、关系表达式和逻辑表达式等。MATLAB 中的数组可以进行这四种运算，而矩阵只能进行前两种运算。

2. 表达式语句

单个的表达式就是表达式语句，一行可以只有一个表达式语句，也可以有多个表达式语

句，这时语句间用分号“;”或逗号“,”分隔。语句以回车换行结束。以分号结束的语句执行后不显示运行结果，以逗号和回车键结束的语句执行后即显示运行结果。如果一条语句需要占用多行，这时需要使用连续符“…”。

3. 赋值语句

将表达式的值赋与变量则就是赋值语句。

```
A =3 +7*8
x =10*sin (2*pi*f*t)
z =2*x +5*y
```

1.5.2　流程控制语句

MATLAB 语句一般是逐条执行的，如果需要中途改变执行的次序，这就是需要流程控制。MATLAB 的流程控制语句有：if、while 和 for 三种。在 5.0 版后又增加了 switch-case 语句。

1. if 语句

if 语句有三种形式，分别为

if（表达式），语句组 A，end

if（表达式），语句组 A，else 语句组 B，end

if（表达式 1），语句组 A，elseif（表达式 2）语句组 B，else 语句组 C，end

三种形式都以“if”开始，以“end”结束。最后的“end”是必不可少的，否则在 if 语句执行完后，就会找不到后续程序的入口。语句中的表达式的真“1”和假“0”指示了语句转移的条件。if 语句三种形式的程序结构如图 1-6 所示。

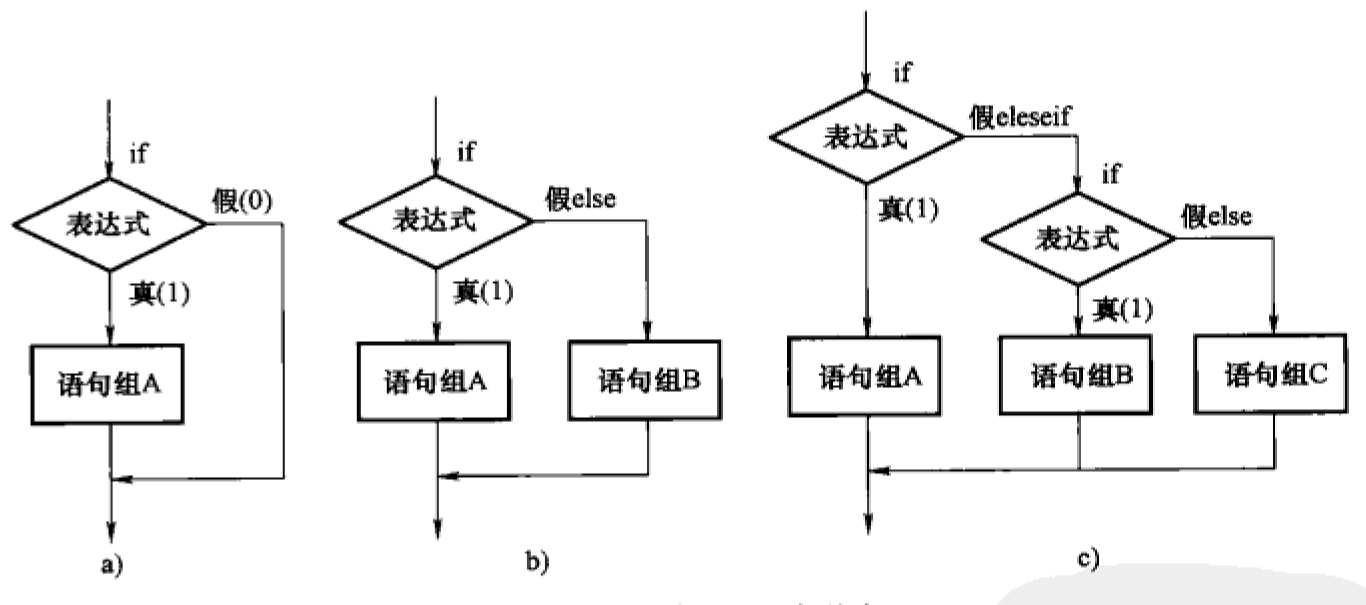


图 1-6　if 语句的三种形式

2. while 循环语句

while 语句的格式为

while（表达式），语句组，end

while 循环语句的流程如图 1-7 所示。语句的执行规则是：当表达式为真“1”时，则执行循环体的语句组，并再次计算表达式的值，如果表达式还是为真，则继续循环，直到表达式的值为否“0”后，才跳出循环，继续向下执行。

3. for 循环语句

for 语句的格式为：

for k = 初始值：增量：终止值，语句组，end

for 语句将循环体中的语句组循环执行 N 次，每执行一次，k 值就增加一个增量，所以循环的次数 N 为

$N = 1 + ($终值 $-$ 初值$)/$增量

当 k 值等于终止值后，循环结束，程序转向 end 以后的语句。For 语句可以嵌套使用。在循环（语句 while 和 for）执行中，如果满足一定条件需要跳出循环，可以使用 break 命令终止循环。

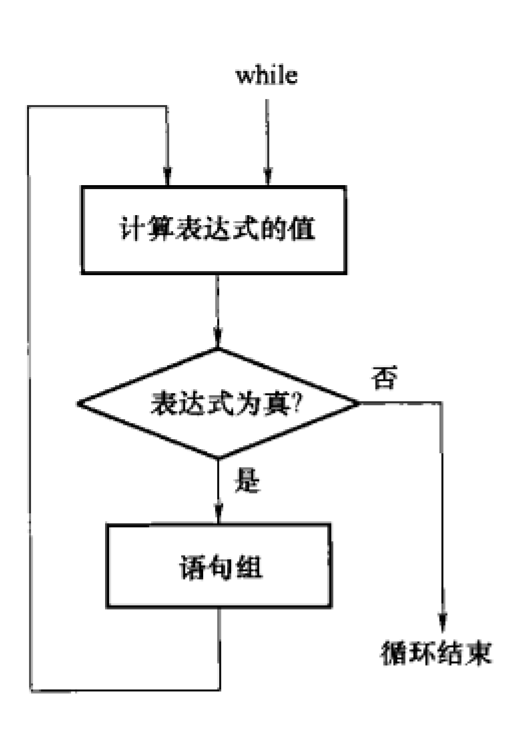


图 1-7 while 语句流程图

4. switch-case 语句

switch-case 语句是一种多分支语句，语句的格式为：

switch 表达式（标量或字符串）
case 值 1
语句组 A
case 值 2
语句组 B
… …
otherwise
语句组 N
end

在 switch-case 语句中，当表达式的值（或字符串）与某个 case 值（或字符串）相同时，就执行该 case 值以下的语句组。如果表达式的值（或字符串）与任何一个 case 值都不相同，则执行 otherwise 后的语句组 N。

1.6 其他 MATLAB 的常用命令

MATLAB 的命令很多，前面介绍的数学运算和流程控制都是 MATLAB 的命令，下面再介绍一些常用的一般命令（见表 1-7）。

表 1-7 MATLAB 的常用命令

命令	简要说明	命令	简要说明
demo	打开 MATLAB 的示范(demo)	save	保存程序
help	线上查寻指令	who	列出变量名
info	显示 matlab 的有关信息	whos	列出变量的详细情况
lookfor	利用关键词找相关指令	cd	改变当前的工作目录
path	显示路径	delete	删去一个文件
type	显示 MATLAB 文件的内容	diary	存储在 MATLAB 环境下的文字
what	显示 MATLAB 某一目录下的文件	dir	显示目录
which	显示某一文件的路径	unix	用于运行 unix 的命令
clear	清除变量(内置的常数和变量除外)	!	用于运行 dos 的命令
clc	清除命令窗口的显示	format	设定输出格式
disp	显示一字符串	matlabrc	Matlab 启动文件
length	求出一个矢量的长度	quit	退出 matlab
load	装入程序的命令		

1.7　MATLAB 的绘图功能

MATLAB 计算的结果是数据，这些数据放在工作间（Workspace）中，如果数据量很大时，阅读这些数据是很困难的，习惯是用曲线和图形表示。MATLAB 可以根据给出的数据，用绘图命令画出其图形，通过图形描述计算的结果，并且可以对图形进行处理，如加上标题、坐标、网格线和颜色等等。本书后面的仿真波形，除小部分示波器画面是用屏幕复制方法截取以外，主要都通过 MATLAB 的绘图功能绘制。

MATLAB 有很强的绘图功能，可以绘制二维图形、三维图形、直方图和饼图等，这里仅介绍一些常用的基本绘图命令和方法（见表 1-8）。

表 1-8　常用的绘图命令

基本 *X-Y* 图形	plot	线性 *X-Y* 坐标图
	loglog	双对数坐标图
	semilogx	半对数(*X* 轴)坐标图
	semilogy	半对数(*Y* 轴)坐标图
	plotyy	双 *Y* 轴坐标图
	polar	极坐标图
坐标控制	axis	坐标分度、范围
	hold	保持当前图形
	subplot	拆分子图
图形注释	title	标上图名
	text	图上标注文字
	grid	加上网格线
	gtext	用鼠标定位文字
	xlabl	*X* 轴文字标注
	ylabl	*Y* 轴文字标注
	Legend	标注图例

1.7.1　直角坐标中的二维曲线

在 *X-Y* 直角坐标系上画平面曲线是最常用的绘图方法，MATLAB 绘制平面曲线的基本命令是 plot 命令。在平面上画一条曲线时 plot 命令的用法如下：

1. plot（A）

在 *X-Y* 平面上画一维数组 A 的图形。命令中 A 是一维数组的变量名。键入命令，在 *X-Y* 平面上画出的曲线，其 *X* 轴表示数组 A 中元素的下标，*Y* 轴表示数组 A 中对应元素的值。

【例 1-1】　用随机函数画出 20 个随机数的曲线

```
>> A = rand(1,20)
A =
  Columns 1 through 7
    0.9501    0.2311    0.6068    0.4860    0.8913    0.7621    0.4565
  Columns 8 through 14
```

```
     0.0185    0.8214    0.4447    0.6154    0.7919    0.9218    0.7382
  Columns 15 through 20
     0.1763    0.4057    0.9355    0.9169    0.4103    0.8936
≫ plot(A)
```

画出的曲线如图 1-8 所示，rand 函数产生的随机数最大值为 1，最小值为 0，20 个随机数的值之间用折线连接。

2. plot （A,B）

画二维数组 A 和 B 组成的曲线。二维数组 A 和 B 组成的曲线是以数组 A 的元素为 X 轴，Y 轴上是对应的数组 B 的元素。A 和 B 之间要用逗号“,”分隔。

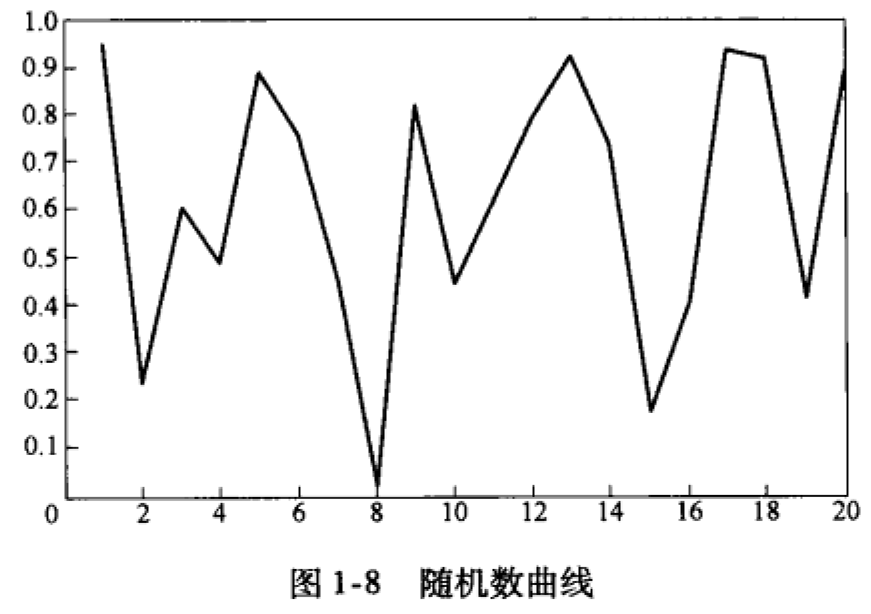


图 1-8　随机数曲线

【例 1-2】 画一条按正弦衰减的曲线

```
≫ t=0：0.2：6*pi；
≫ b=exp（-0.1*t）.*sin（t）；
≫ plot（t，b）
```

命令执行后得到如图 1-9 所示的曲线，图中 X 轴是时间 t，Y 轴是衰减函数值 b。

图 1-9　正弦衰减曲线

1.7.2　多条曲线的绘制

如果要在一张图上绘制多条曲线，使用 plot 语句的格式为：

1. plot （x1,y1,x2,y2,…,xn,yn）

该语句中，x1，y1，x2，y2，…，xn，yn 为 n 组数据，每对数据可以画出一条曲线，一对数据必须有相同的长度，各对数据的长度可以不同。

【例 1-3】 在一张图上画一条幅值为 10 的一条正弦曲线和一条幅值为 8 的余弦曲线（见图 1-10）。

命令如下：

```
t=0：0.1：4*pi；
```

```
y1 =10*sin (t);
y2 =8*cos (t);
  plot (t, y1, t, y2)
```

plot 命令回车执行后，得到两条正余弦曲线如图 1-10 所示。

2. plot (t,[y1,y2, …,yn])

如果多条曲线有共同的 *X* 轴变量，则多个 *Y* 轴变量可以用方括号括起来。该语句中，"t" 为向量，y=[y1, y2, …, yn] 是矩阵，若 "t" 是列（或行）向量，则 "y" 的列（或行）长度应与 "t" 的长度相同，"y" 的行（或列）数就是曲线的根数。

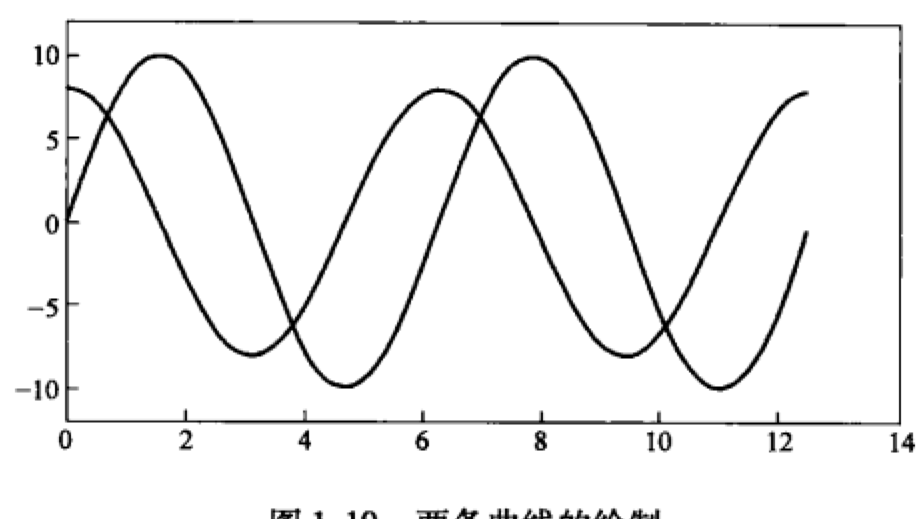


图 1-10 两条曲线的绘制

3. plot (x1,y1), **hold**, **plot** (x2,y2)

该语句组是将曲线逐条画到一张图上。在画了第一条曲线后，用 "hold" 命令保持第一条曲线，然后在同一张图上再画上第二条曲线。

4. plotyy

使用这条命令，可以用两种 *Y* 轴比例画图，但是 *X* 轴比例仍是一个。仍以例 1-3 为例说明。但在例题中将正弦曲线幅值放大 50 倍，显然这两条曲线画在一张图上是不合适的。这时可以使用 plotyy 命令，用两个比例来画图。

```
t=0:0.1:4*pi;
y1 =10*sin(t);
y2 =8*cos(t);
y4 =50*y1;
plotyy(t,y4,t,y2)
```

画得的波形如图 1-11 所示，图中正弦曲线的 *Y* 轴比例尺在左边，余弦曲线的比例尺在右边。

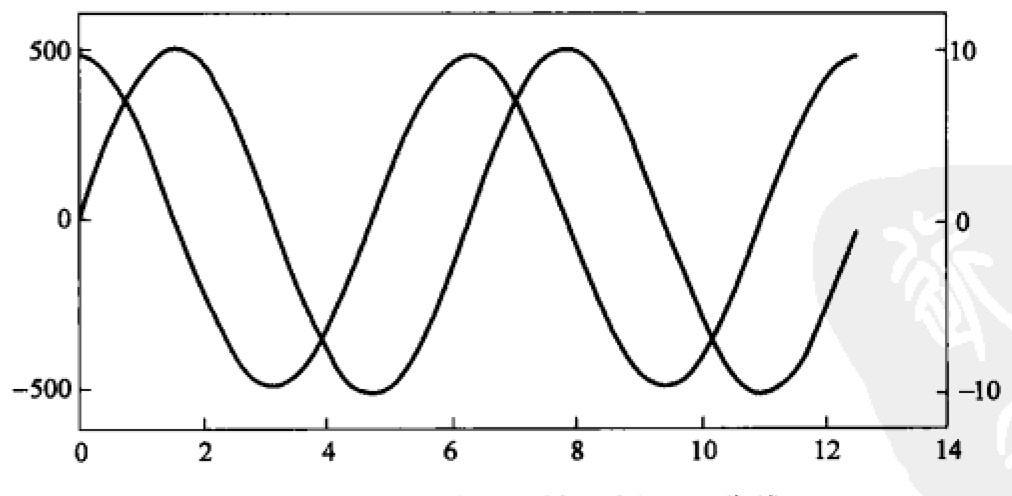


图 1-11 以不同的 *Y* 轴比例尺画曲线

1.7.3 曲线的线型和颜色

多条曲线绘图时，MATLAB 会自动地以不同颜色标出曲线，以便区分。如果对曲线的

颜色和线型另有要求，可以在绘图命令中指出，命令的格式为：

plot（x1，y1，'<线型标识符><颜色标识符>'，x2，y2，'<线型标识符><颜色标识符>'…）

线型标识符和颜色标识符见表 1-9。

表 1-9 颜色和线型标识符

颜色标识符	颜色	线型标识符	线型
y	黄	.	点
m	品红	o	小圆圈
c	青	×	叉号
r	红	+	加号
g	绿	-	实线
b	蓝	*	星号
w	白	:	虚线
k	黑	-.	点划线
		--	长划线

1.7.4 MATLAB 的图形窗口

在 MATLAB 上，图形都画在图形窗口中，键入命令"figure"，可弹出图形窗口。实际上运行 plot 命令后，图形窗口就已经自动打开了，不过图形窗口有时在屏幕的下层，这时看屏幕下方的提示栏，有一个 Figure1 No. 1 文件，点击该文件，图形窗口就移到上层，图形窗口的画面如图 1-12 所示。

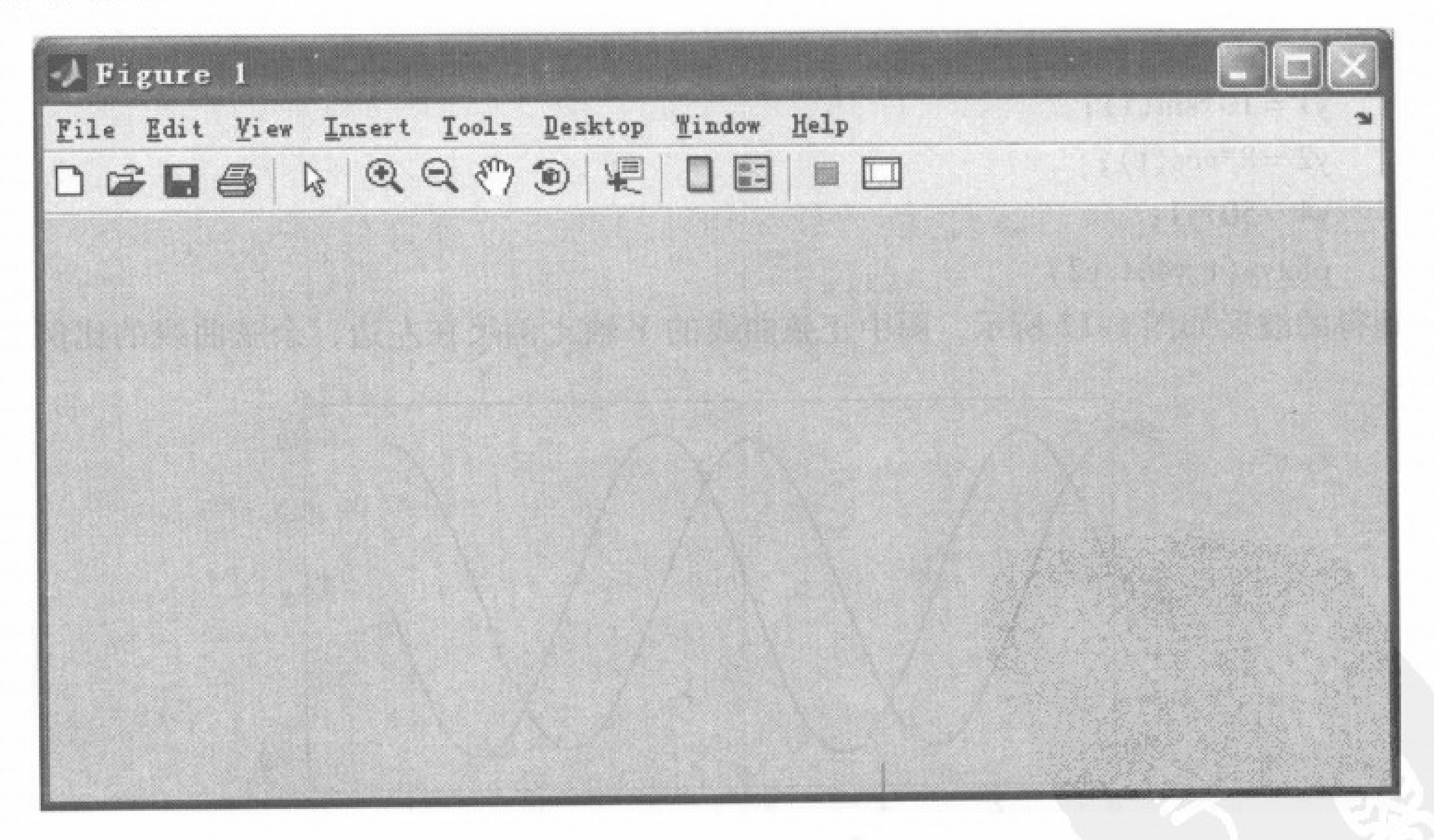


图 1-12 空白的图形窗口

图形窗口上方是标题、主菜单和快捷键工具栏。菜单中的文件打开、保存、复制、粘贴、打印等功能与其他 Windows 菜单功能相类似，这里介绍一些绘图中常用的特殊功能。

1. 设置图形画面参数

用 MATLAB 绘图命令 plot 画出的是简单的曲线和波形，为了使图形画面很好地说明问题，画面更美观，往往需要在画面上添加一些内容，如标题、物理量、单位、网格线和文字等。在主菜单 Edit 下提供了三个选项，可以使图形进入编辑状态。这三个命令是：

1）Figure Properties …：图面参数设置；

2）Axes Properties …：坐标参数设置；

3）Copy Figure：将图复制到粘贴板上。

改变图面背景颜色：图形窗口图形区的原始背景是暗淡的灰色（见图 1-12），可以用“Figure Properties …”选项改变背景颜色。在点击“Figure Properties …”后，弹出图1-13下部的对话框。在对话框 Figure Color 的下拉菜单中有各种颜色可以选择，图 1-13 是选择白色背景后的效果。

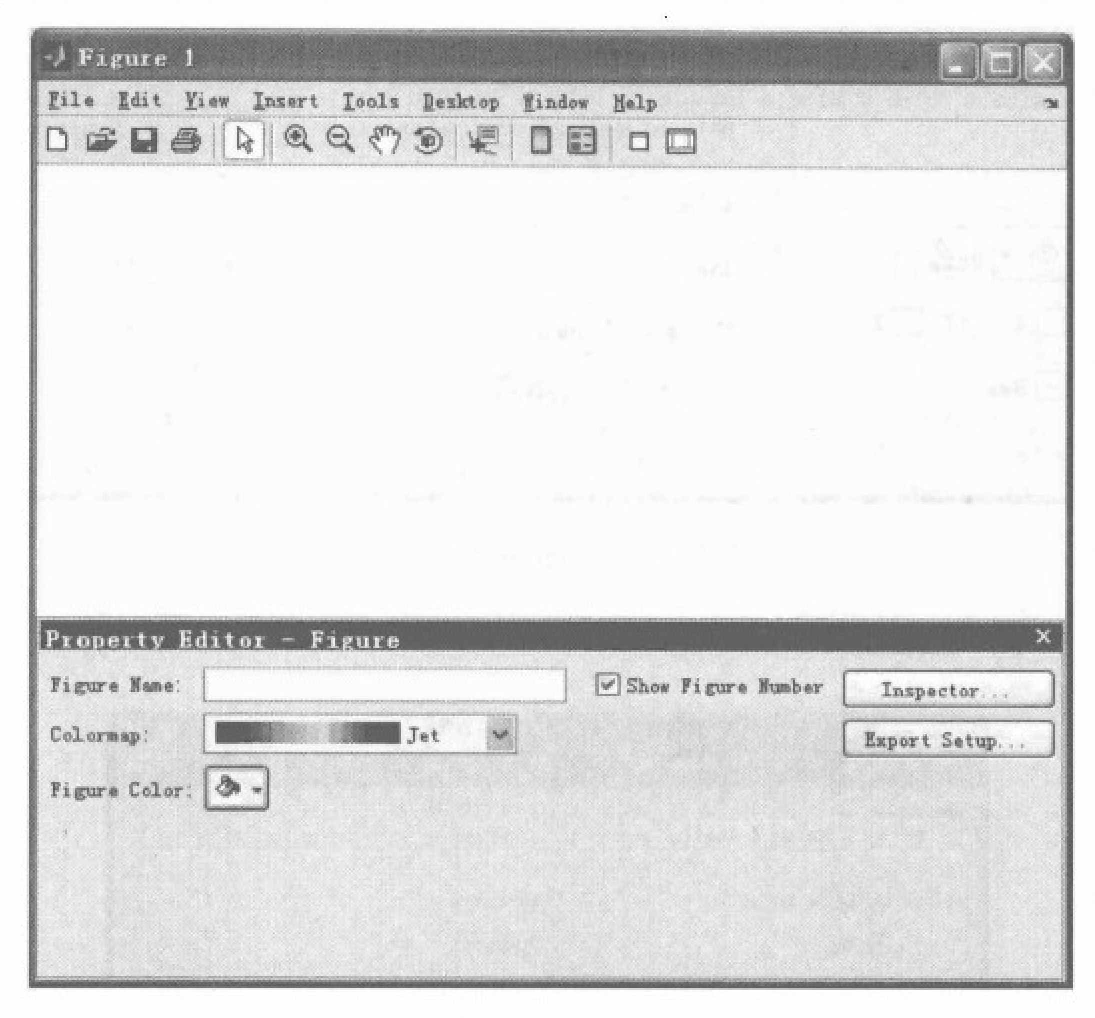


图 1-13 图面参数对话框

2. 设置标题和坐标轴物理量等

点击“Axes Properties …”选项弹出（见图 1-14）对话框。对话框内有 7 页，其中“Scale”和" Labels" 是常用的两页。

在坐标参数页（Scale）中（见图 1-14），可以设置 *X*、*Y*、*Z* 三个轴的参数：坐标的范围（Limits）、坐标的分度（Ticks）、选择需要标示的分度值（Labels）、坐标类型选择（Scale）和网格线（Grid）等。这些项系统默认的是“自动（Auto）”方式，即软件会根据输入的图形，自动选定坐标范围，适当的分度和标注。如果要另行设定，只需要点击该项后面的小方框，将框中的“√”号去掉，其后的参数框变亮，这时就可以进行新的参数设置。

坐标的类型有线性（Linear）和对数（Log），标准（Normal）和反置（Reverse）可选。网格线可以选择显示或者隐藏。

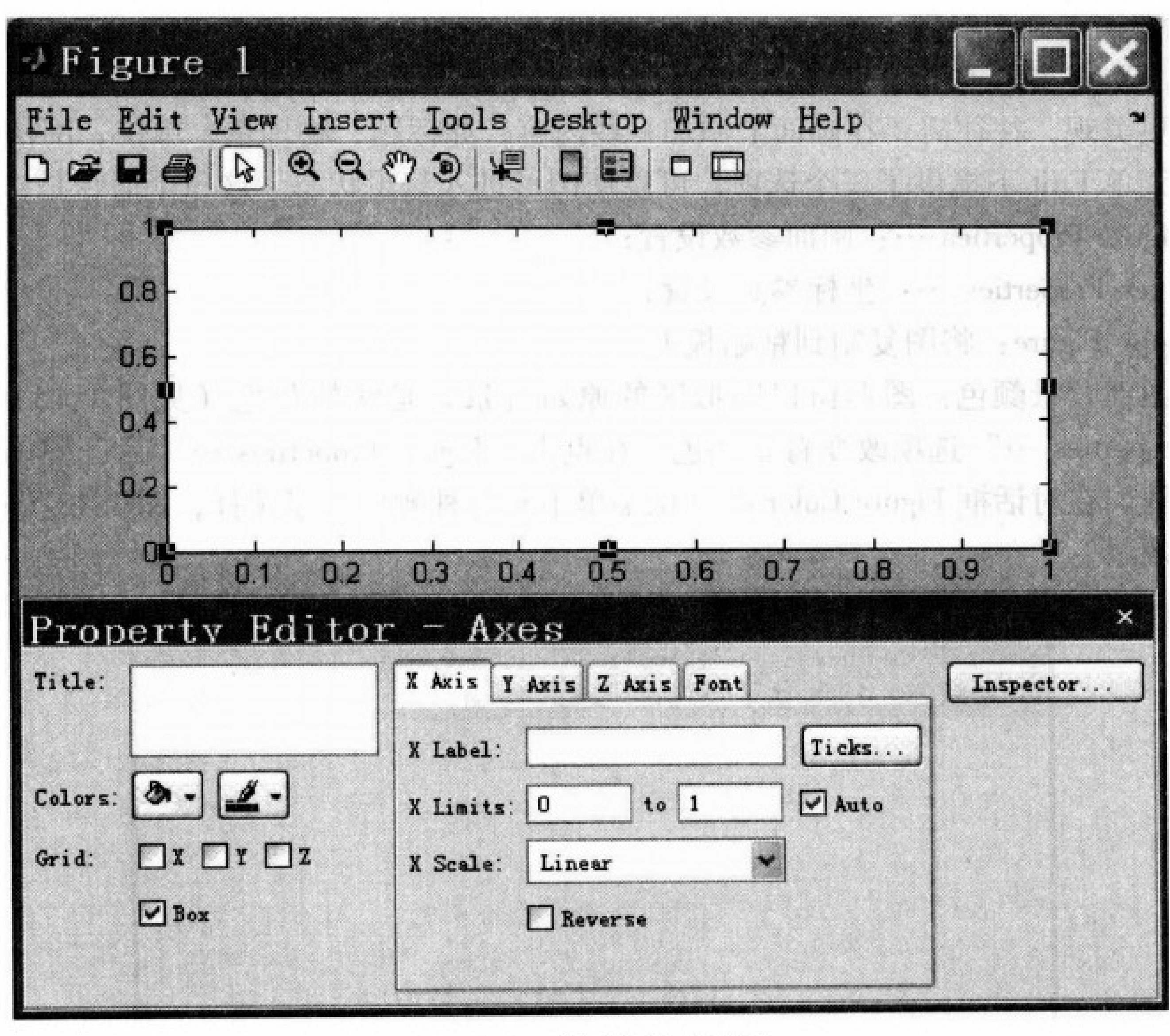


图 1-14　坐标参数对话框

选择“Ticks…”项，则出现如图 1-15 所示的画面，在该页中可以修改 *X* 轴向和 *Y* 轴向的标尺等。

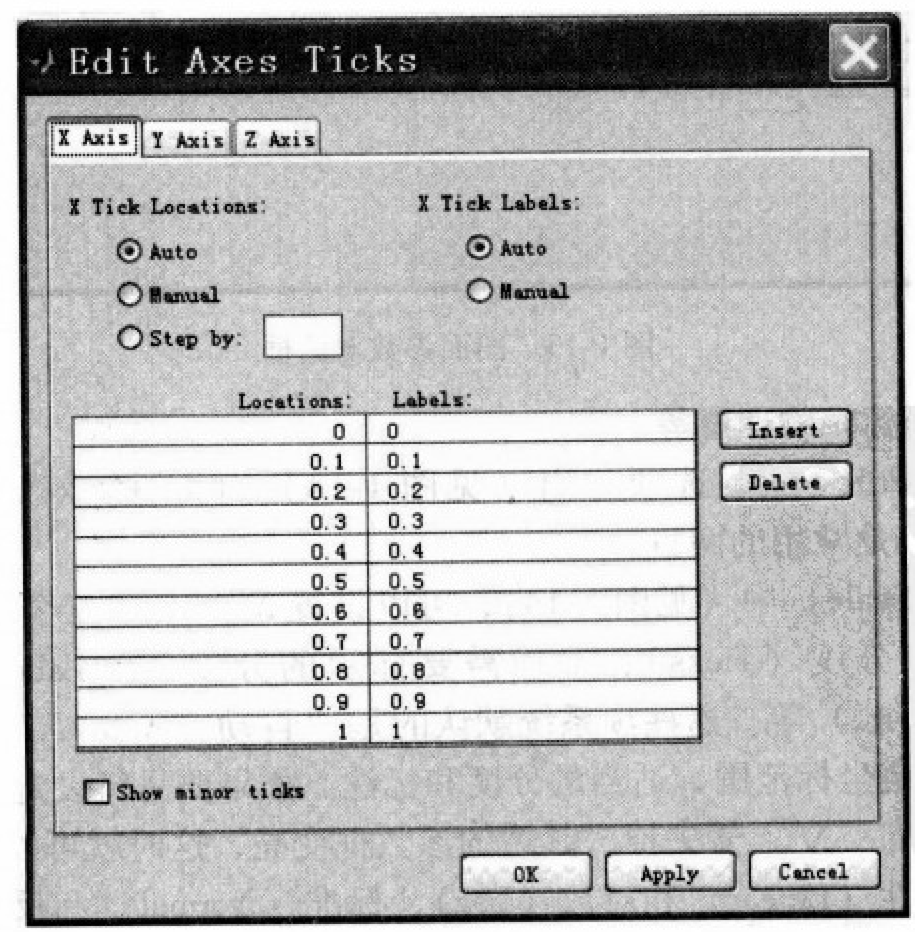


图 1-15　图形标签页

3. 在图形上添加箭头、线段和文字

如果需要在图形画面上添加箭头、线段和文字，只需要使用图形窗口 Isert、Tools 等菜单中的功能。选定工具后，拖拉光标就可以在图形上添加箭头和线段，并且可以键入文字。如果对箭头、线段和文字的位置不满意，可以将光标指向该箭头、线段或文字，点击选中，则可拖拉移动到恰当位置，如果拖拉箭头、线段两端的小黑块，可以调整箭头和线段的长度和方向。在选中箭头和线段后，点击鼠标右键，则弹出选项框，在选项框中，可以选择箭头和线段的线型和磅值。可以选择的线型和磅值如图 1-16 所示。

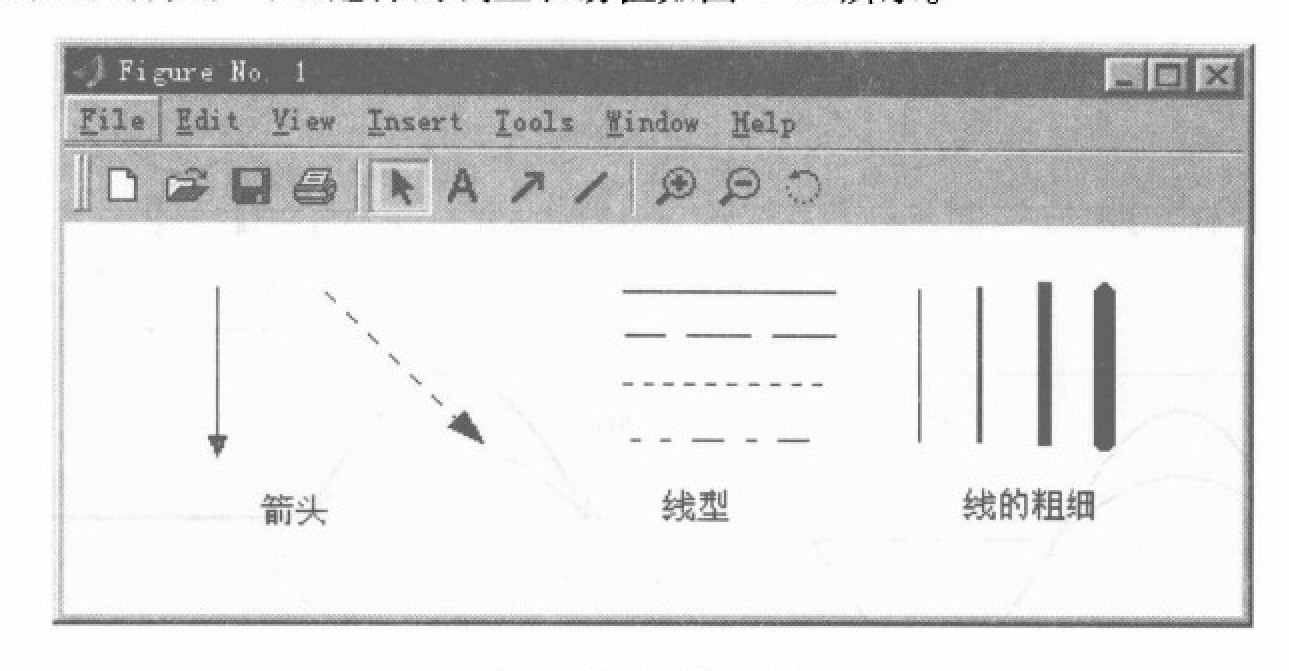


图 1-16　箭头和线型

1.8　电力电子电路波形图的绘制

利用 MATLAB 的命令和函数可以绘制电力电子电路的电压、电流等的波形，下面举例说明。并通过此例题进一步介绍 MATLAB 的绘图过程。对于电力电子电路的分析，使用 SIMULINK 仿真可以得到更好的效果，这将在后面介绍。

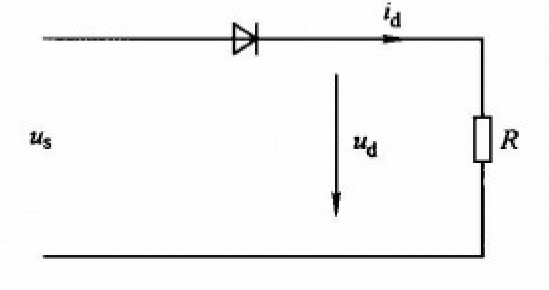


图 1-17　单相半波不控整流电路

【例 1-4】　单相半波不控整流电路（如图 1-17 所示），已知交流电源电压为 220V，负载电阻为 2Ω。画出交流电源电压、整流输出电压和电流的波形。

MATLAB 命令窗口键入命令如下：（命令前的行号是为说明而另加的）：

```
1    >> V =220 ;                        % 交流电压有效值
2    >> R =2;                           % 电阻值
3    >> dth = pi/360;                   % 导通角增量
4    >> th =0:dth:2 * pi;               % 一周期中导通角
5    >> vs = V * sqrt(2) * sin(th);     % 交流电压
6    >> ud = vs. * (vs > =0);           % 整流输出电压
7    >> id = ud/R;                      % 整流输出电流
8    >> plot(th,vs),   hold             % 画交流电压波形
```

Current plot held

9 ≫ plot(th,ud,th,id) % 画整流电压电流波形

命令中，1 ~7 行为赋值命令，第 8 行命令画交流电压的波形，按回车键执行命令，则画出交流电压的波形，如图 1-18a 所示。在该行中使用了“hold”命令，目的是在画下面波

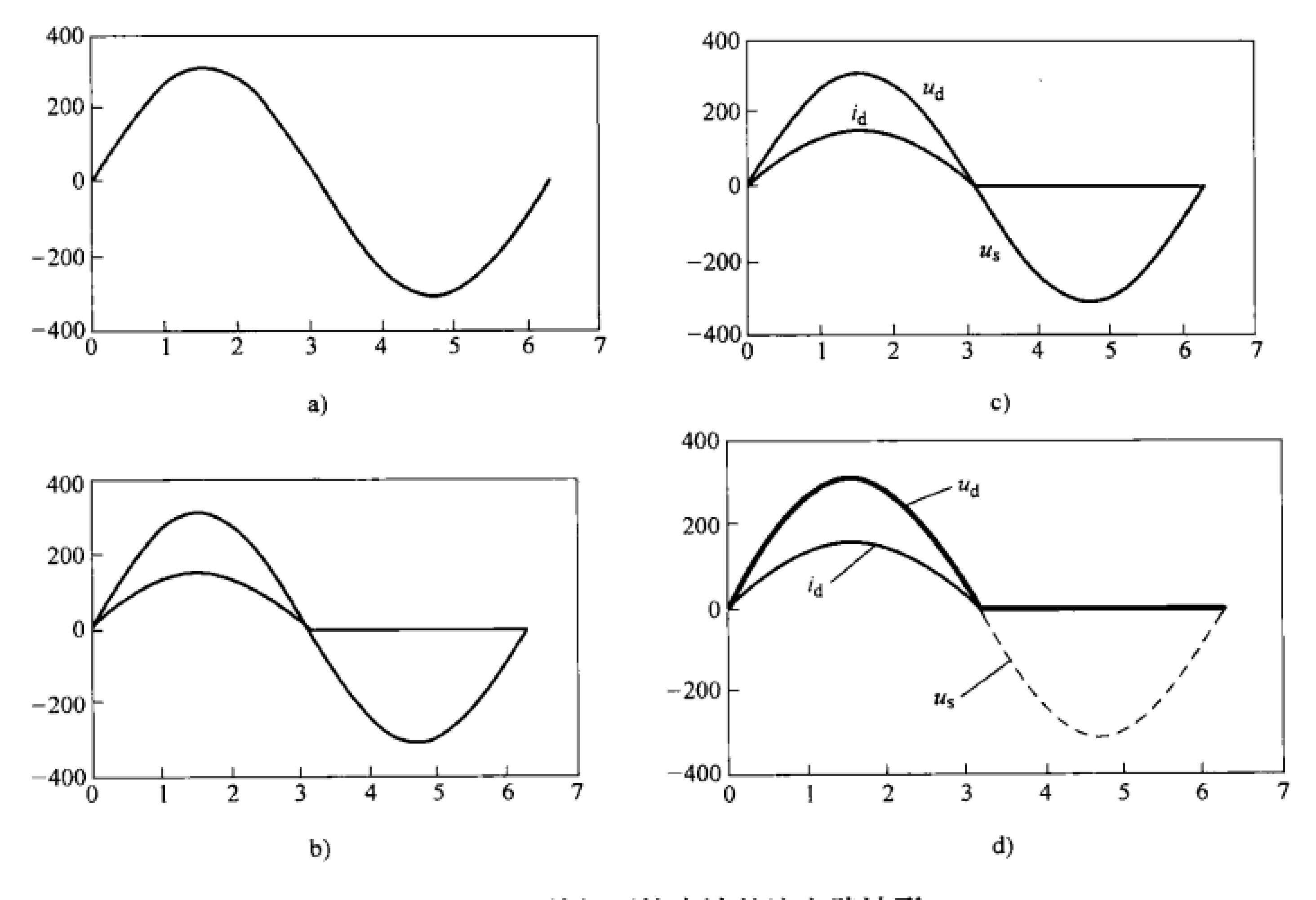


图 1-18 单相不控半波整流电路波形

形时，交流电压的波形还会保留，不会被清除掉。执行第 9 行命令后，电源电压、输出电压和输出电流三条曲线就出现在同一幅图上（见图 1-18b）。在图形窗口，这三条曲线是以不同颜色来区分的，但是如果将这图形复制到黑白文档上时，有的颜色线条就显示不出来，图中的处理方法是将这三条曲线都置成黑色（见图 1-18c），然后用文字和不同的线型来区分这三条曲线。标注符号或文字选择 Insert 菜单中的 Title 功能；改变线型和颜色，可以将光标指向曲线，点击右键，在弹出的对话框中选择。加上文字和改变线型后的图形如图 1-18d 所示。

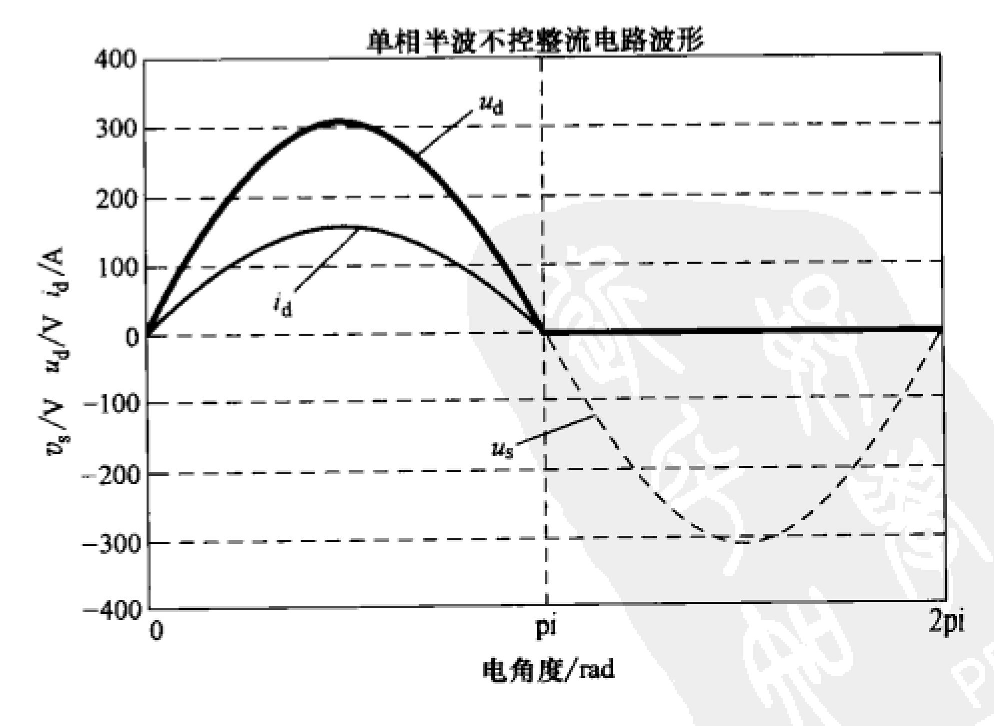


图 1-19 修改后的图形画面

图 1-18 的波形图还可以进一步美化，使图有更好的可读性。使用图形窗口 Edit 菜单下的“Axes Properties …”选项，设置 X-Y 坐标轴和名称等（见图 1-19）。

【例 1-5】 单相桥式全控整流电路（见图 1-20），交流电源电压

为 120V，阻感负载。画出控制角为 π/6 时，整流电路负载侧的电压波形。

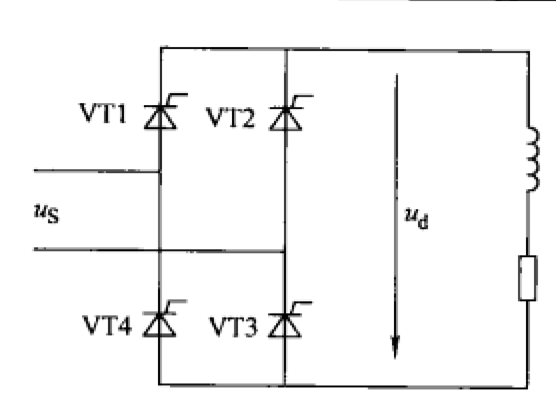


图 1-20 单相桥式全控整流电路

```
>> VS = 120;
>> Ud = 0.9*VS*cos(alpha);
>> th = 0:delta:2*pi + alpha;
>> vs = 120*sqrt(2)*sin(th);
>> th1 = pi/6: delta: pi + pi/6; ud1 = 120 * sqrt (2) * sin (th1);
>> ud1 = 120*sqrt(2)*sin(th1);
>> th2 = pi + pi/6:delta:2*pi + pi/6;
>> ud2 = 120*sqrt(2)*sin(th2);
>> th3 = 0:delta:pi/6;
>> ud3 = 120*sqrt(2)*sin(th3);
>> plot(th,vs,th1,ud1)                           % VT1 和 VT3 导通区间
>> plot(th,vs,th3,-ud3,th2,-ud2)                 % VT2 和 VT4 导通区间
>> plot(th,vs,th3,-ud3,th1,ud1,th2,-ud2)         % 整流器输出电压
```

图 1-21 所示为晶闸管 VT1、VT3 导通区间的整流器输出电压波形，交流电源电压以点线标出。图 1-22 所示为晶闸管 VT2、VT4 导通区间的整流器输出电压波形，图 1-23 所示为整流器一个周期输出电压波形，图 1-24 所示为加上图注后的波形图。

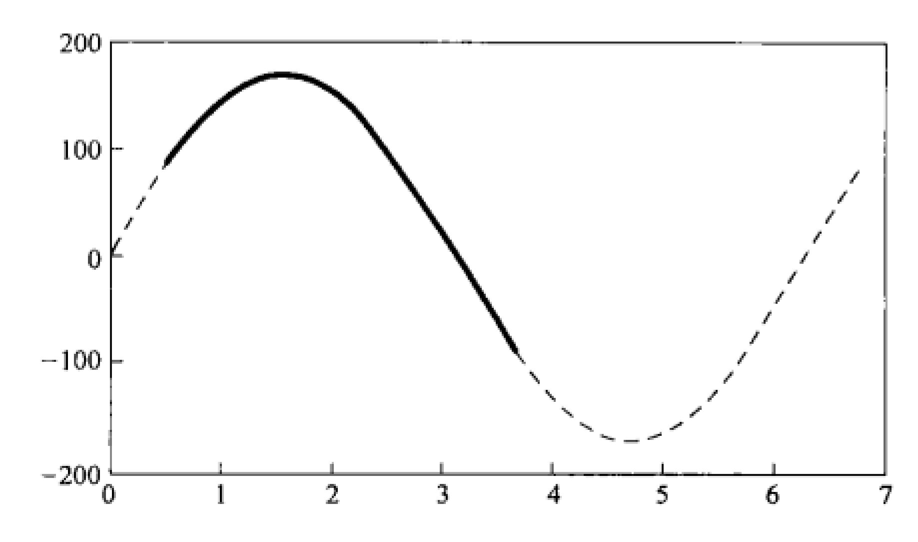


图 1-21 晶闸管 VT1、VT3 导通区间的整流器输出电压波形

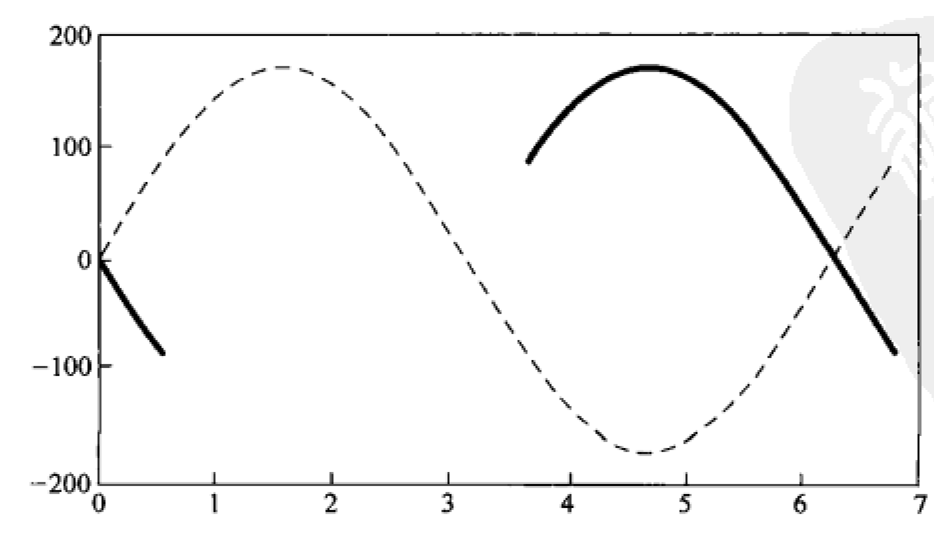


图 1-22 晶闸管 VT2、VT4 导通区间的整流器输出电压波形

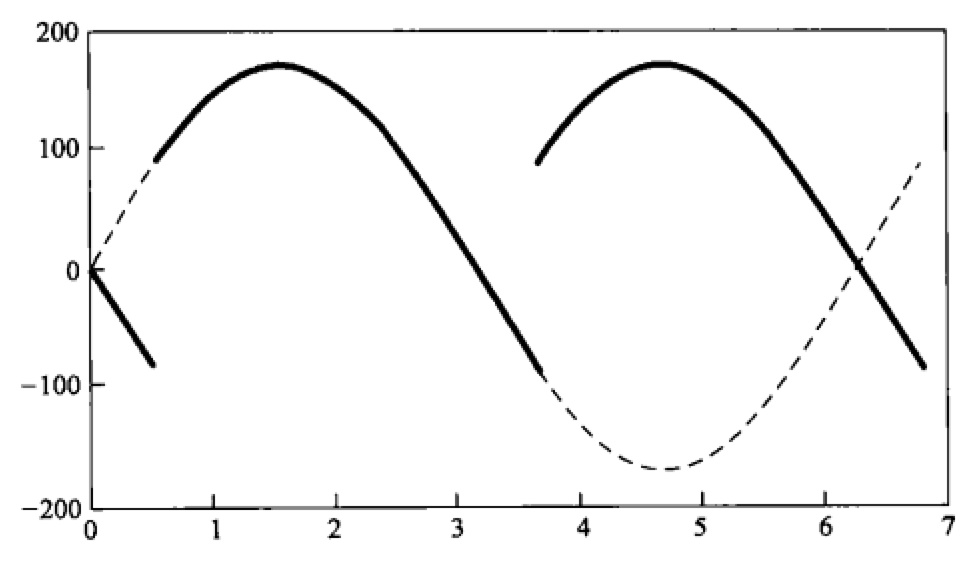


图 1-23　整流器一个周期整流电压波形

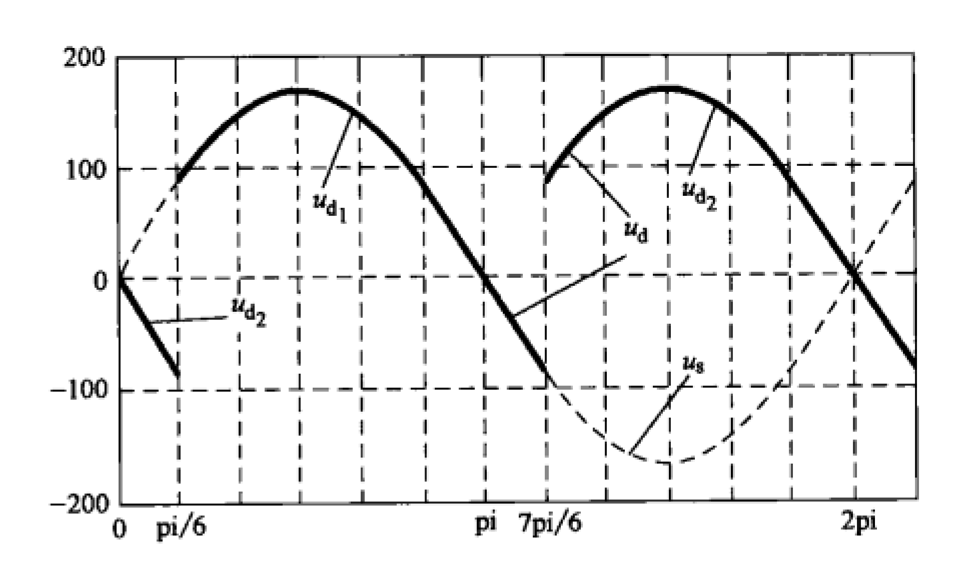


图 1-24　带坐标和标注的整流电压波形



第 2 章　SIMULINK 环境和模型库

MATLAB 的 SIMULINK 是很有特色的仿真环境，在此环境中，用户可以用点击、拖拉鼠标的方式绘制和组织系统或电路，并完成对系统和电路的仿真。早期 MATLAB 的仿真编程是在文本窗口进行的，编制的程序是一行行命令和 MATLAB 函数，不直观，也难于和实际的物理系统或电路建立形象的联系。在 SIMULINK 环境中，系统的函数和电路元器件的模型都用方框图形的模块表达，模块之间的连线则表示了信号流动的方向。对用户来说，只要学习图形界面的使用方法和熟悉模型库的内容，就可以很方便地使用鼠标和键盘进行系统和电路的仿真，而不必去记那些复杂的函数，这无疑是受欢迎的。MATLAB 模型库已经有极其丰富的内涵，现结合本书的内容，主要介绍 SIMULINK 工作环境以及系统仿真（SIMULINK）和电力系统（SimPower system）两个模型库。

2.1　系统仿真（SIMULINK）环境

SIMULINK 系统仿真环境也称工具箱（Toolbox），是 MATLAB 最早开发的，它包括 SIMULINK 仿真平台和系统仿真模型库两部分，主要用于仿真以数学函数和传递函数表达的系统，是 20 世纪 70 年代开发的连续系统仿真程序包（CCS）的继续，现在的系统仿真（SIMULINK）包括了连续系统、非线性系统和离散系统的仿真。由于 SIMULINK 的仿真平台使用方便，功能强大，后来拓展的其他模型库也都共同使用这个仿真环境，成为 MATLAB 仿真的公共平台。SIMULINK 是 simulation 和 link 两个英文单词的缩写，意思是仿真链接，MATLAB 模型都在这环境中使用，从模型库中提取模型放到 SIMULINK 的仿真平台上进行仿真，所以，有关 SIMULINK 的操作是仿真应用的基础。

SIMULINK 作为面向系统框图的仿真平台，它具有如下特点：

1）以调用模块代替程序的编写，以模块连成的方框图表示系统，点击模块即可以输入模块参数。以框图表示的系统应包括输入（激励源）、输出（观测仪器）和组成系统模块。

2）系统方框图画完，设置了仿真参数，即可启动仿真，这时会自动地完成仿真系统的初始化过程，将系统的框图转换为仿真的数学方程，建立仿真的数据结构并计算系统在给定激励下的响应。

3）系统运行的状态和结果可以通过波形和曲线观察，这与在实验室中用示波器观察的效果几乎一致。

4）系统仿真的数据可以用 . mat 为后缀的文件保存，并且可以用其他数据处理软件处理。

5）如果系统方框图绘制不完整或仿真过程中出现计算不收敛的情况，会给出一定的出错提示信息，但是这些提示不一定准确，这是软件还不够完备的地方。

6）以框图形式仿真控制系统是 SIMULINK 的最早功能，后来在 SIMULINK 的基础上又

开发了数字信号处理、通信系统、电力系统、模糊控制等数10种模型库，但是SIMULINK的窗口界面是其他工具箱共用的平台，在这平台上可以进行控制系统、电力系统、通信系统等各种系统的仿真。

7）SIMULINK中，电力系统模型库Power System Block在MATLAB6.5以前使用的是Version 2版本，MATLAB6.5以后升级为Version 3，模块以电路接口替代了原先的信号接口，使电力电子电路的建模更为方便。

2.1.1 SIMULINK的工作环境

1. SIMULINK环境的进入

从MATLAB窗口进入SIMULINK环境有几种方法（见图2-1）：

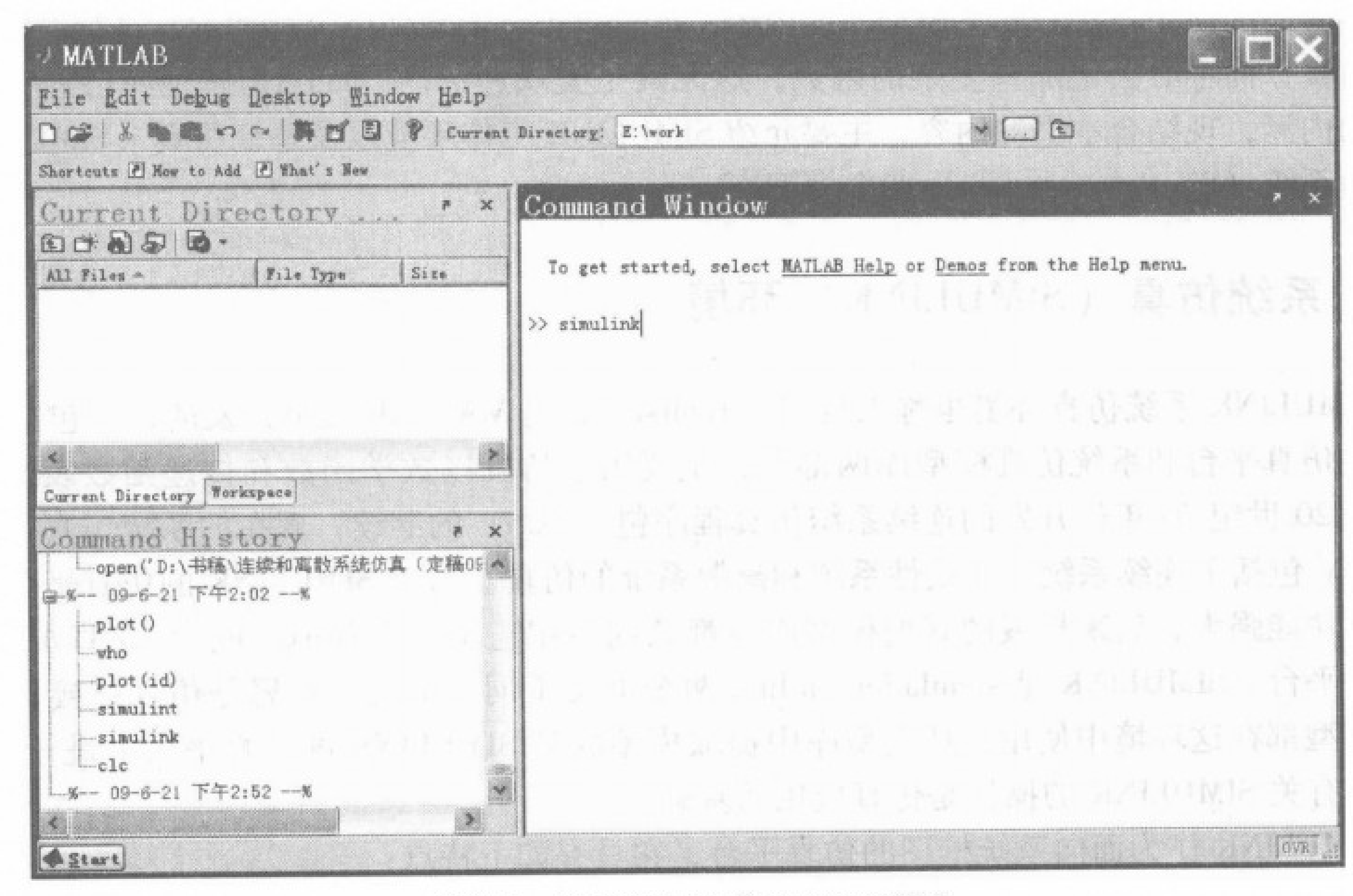


图2-1 从MATLAB进入SIMULINK

1）在MATLAB的菜单栏上选择File，在下拉菜单中的New选项下选中Model。

2）在MATLAB的工具栏上点击按钮，然后在打开的模型库浏览窗口菜单上点击快捷键。

3）在MATLAB的文本窗口中，键入“SIMULINK”后回车，然后在打开的模型库浏览窗口的菜单上点击快捷键。

完成上述操作之一后，屏幕上出现SIMULINK的工作窗口（见图2-2）。在SIMULINK窗口上方标题栏上，“untitled”表示是一个尚未命名的新文件，在其上方右侧是最小化、最大化和关闭三个按钮。标题栏下方是菜单栏，这里有File（文件）、Edit（编辑）、View（查看）、Simulation（仿真）、Format（格式）、Tools（工具）和Help（帮助）7项主要功能菜单。第三栏是菜单命令的等效快捷键。窗口下方有仿真状态的提示栏，在启动仿真后，在该栏可以提示仿真的进度和使用的仿真算法。窗口中部的空白部分是绘制仿真模型框图的空

间，这是对系统仿真的主要工作平台。

在图 2-1 所示的文本窗口有一行提示“To get started, select MATLAB Help or Demos from the Help menu.”，点击其中词“MATLAB Help”可以进入 MATLAB 的帮助辞典，点击“Demos”可以进入 MATLAB 的应用举例。

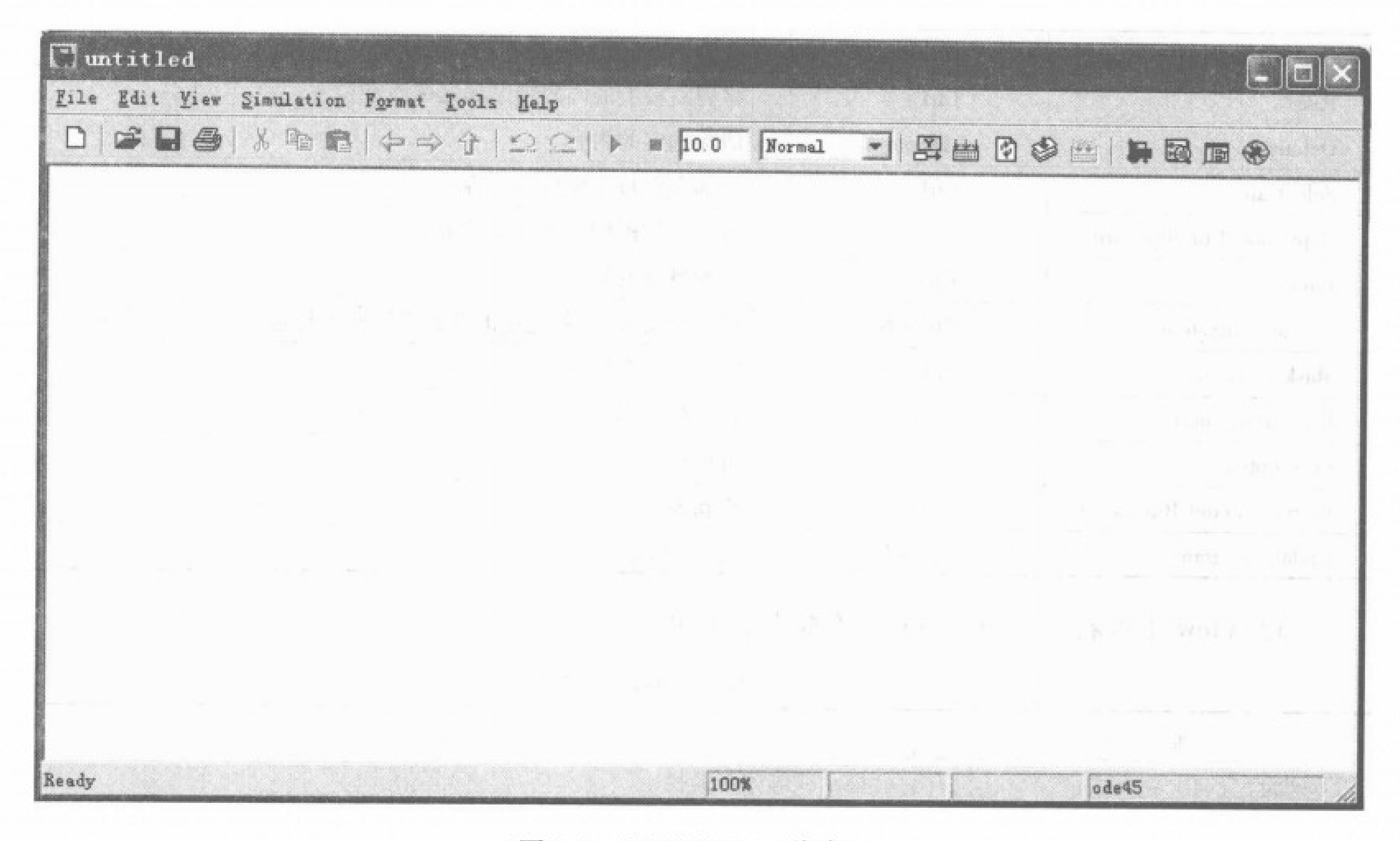


图 2-2　SIMULINK 工作窗口

2. SIMULINK 窗口菜单命令

（1）File（文件）菜单　File（文件）菜单见表 2-1。

表 2-1　File（文件）菜单

选　　项	快捷键	选 项 含 义
New	Ctrl + N	创建新的 SIMULINK 窗口
Open	Ctrl + O	打开已经存在的 SIMULINK 仿真模型文件
Close	Ctrl + W	关闭当前的 SIMULINK 窗口
Save	Ctrl + S	保存当前的仿真模型文件，文件的路径、文件名保持不变
Source control		登记编辑文件的文件名及路径等到源系统中
Model properties		模型属性
Preference		选项
Save as		将当前的仿真模型文件按新的路径、文件名保存
Pint	Ctrl + P	打印模型文件
Pint Setup		打印设置
Exit MATLAB	Ctrl + Q	退出 MATLAB

（2）Edit（编辑）菜单　Edit（编辑）菜单见表 2-2。

表 2-2 Edit（编辑）菜单

选　项	快捷键	选 项 含 义
Undo Add	Ctrl + Z	撤消前一次操作
Redo	Ctrl + Y	恢复前一次操作
Cut	Ctrl + X	剪切选定的内容，并放到剪贴板上
Copy	Ctrl + C	复制选定的内容，并放到剪贴板上
Past	Ctrl + V	将剪贴板上的内容粘贴到光标所在位置
Delete	Delete	清除选定的内容
Select all	Ctrl + A	全部选定整个窗口的内容
Copy model to clipboard		将窗口的模型复制到剪贴板上
Find	Ctrl + F	寻找目标的位置
Greate subsystem	Ctrl + G	创建分支模块，将选定的部分系统模型打包，以一个模块表示
Mask subsystem	Ctrl + M	封装分支模块
Look under mask	Ctrl + U	显示分支模块的内容
Link options		链接选择
Refresh Model Blocks	Ctrl + K	更新模块
Update diagram	Ctrl + D	更新模型框图的外观

（3）View（查看）菜单　View（查看）菜单见表2-3。

表 2-3 View（查看）菜单

选　项	选 项 含 义
Toolbar	显示或隐藏工具栏
Statebar	显示或隐藏状态栏
Model browser Options	模型浏览器功能选择
Block data tips Options	模块功能选择
System Requirments	系统链接设置
library browser	显示模型库浏览器
Model Explorer	模型搜索
Zoom out	放大模型显示比例
Zoom in	缩小模型显示比例
Fit system to view	自动选择合适的显示比例
Normal	标准的显示比例(100%)

（4）Simulation（仿真功能）菜单　Simulation（仿真功能）菜单见表2-4。

表 2-4 Simulation（仿真功能）菜单

选　项	快捷键	选 项 含 义
Start (Pause)	Ctrl + T	启动(或暂停)仿真
Stop		停止仿真
Configuration Parameters	Ctrl + E	仿真参数设置
Normal		用标准模式仿真
Accelerator		仿真加速器
External		外部模式仿真

（5）Format（模块格式）菜单　Format（模块格式）菜单见表 2-5。

表 2-5　Format（模块格式）菜单

选　　项	快捷键	选 项 含 义
Font		字体设置
Text alignment		标题定位
Flip name		移动模块名
Hide(show) name		隐藏(或显示)模块名
Flip block	Ctrl + I	水平反转模块
Rotate block	Ctrl + R	模块旋转 90°
Show(Hide) drop shadow		显示(隐藏)模块的阴影
Show(Hide) port labels		显示(隐藏)子系统标签
Foreground color		设置前景颜色
Background color		设置背景颜色
Screen color		设置屏幕颜色
Port/Signal Displays		接口或数据性质显示
Block Displays		模块显示
Library Link Displays		模型库链接显示

（6）Tools（工具）菜单　Tools（工具）菜单见表 2-6。

表 2-6　Tools（工具）菜单

选　　项	选 项 含 义
SIMULINK debugger	SIMULINK 调试程序
Fixed-point settings	定点运算
Model advisor	模型报告
Model Reference Graph	模型参考图
Lookup Table Editor	模型的表格编辑
Data class designer	数据类型设计
Bus Editor	总线编辑
Profiler	优化 M－文件的工具
Coverage settings	模型设置
Requirements	模型的链接和报告等
Inspect Logged Signal	检查记录信号
Signal & Scope Manager	信号和示波器管理
Real-time workshop	实时工作间选择
External mode control panel	外部模式控制板
Control Design	模型线性化和离散化分析选择
Parameter Estimation	参数估计
Report generator	模型文件设置清单
Data Object Wizard	快速处理数据链接

2.1.2　模型库浏览器（SIMULINK Library BROWSER）

模型库是 SIMULINK 的重要内容，模型库中保存了控制系统中常用的典型环节的模

型，在系统仿真时，只要调用这些典型环节，就可以很方便地组成系统的仿真模型。SIMULINK 工具箱的模型都可以通过模型库浏览器（SIMULINK Library Browser）来查找。在模型库浏览器上有 20 余种模型库，包括电力系统模型库、通信系统模型库、数字信号模型库、定点处理模型库等等。本节主要介绍模型库的打开、模型库的内容和有关模块的一些常用操作。

为了叙述方便，本书将模型库中以图标形式表示的典型环节模型称为模块，将用典型模块组成的系统仿真模型简称为模型。

1. SIMULINK 模型库的打开

打开 SIMULINK 模型库的方法有如下几种：

1）在 MATLAB 窗口的工具栏上点击快捷键 ；

2）在 MATLAB 的文本窗口中键入“simulink”；

3）在 SIMULINK 窗口上点击快捷键 。

完成上述操作之一，即弹出模型库浏览器（SIMULINK Library Browser）窗口（见图 2-3）。窗口左部的树状目录是各分类模型库的名称。在分类模型库下还有二级子模型库，点击模型库名前带“+”的小方块可以展开二级子模型库的目录，点击模型库名前带“-”的小方块可以关闭二级目录。

模型库浏览器窗口的右部是用图标表示的二级子目录，图标前带“+”小方块表明该图标下还有三级目录，在这里点击或直接点击图标可以在窗口中展现三级目录下的模型图标。图 2-4 是打开 SIMULINK 的连续系统子模型库（Continuous）后的窗口。在窗口右边展现了 Continuous 子模型库中的 8 个典型环节的模块。

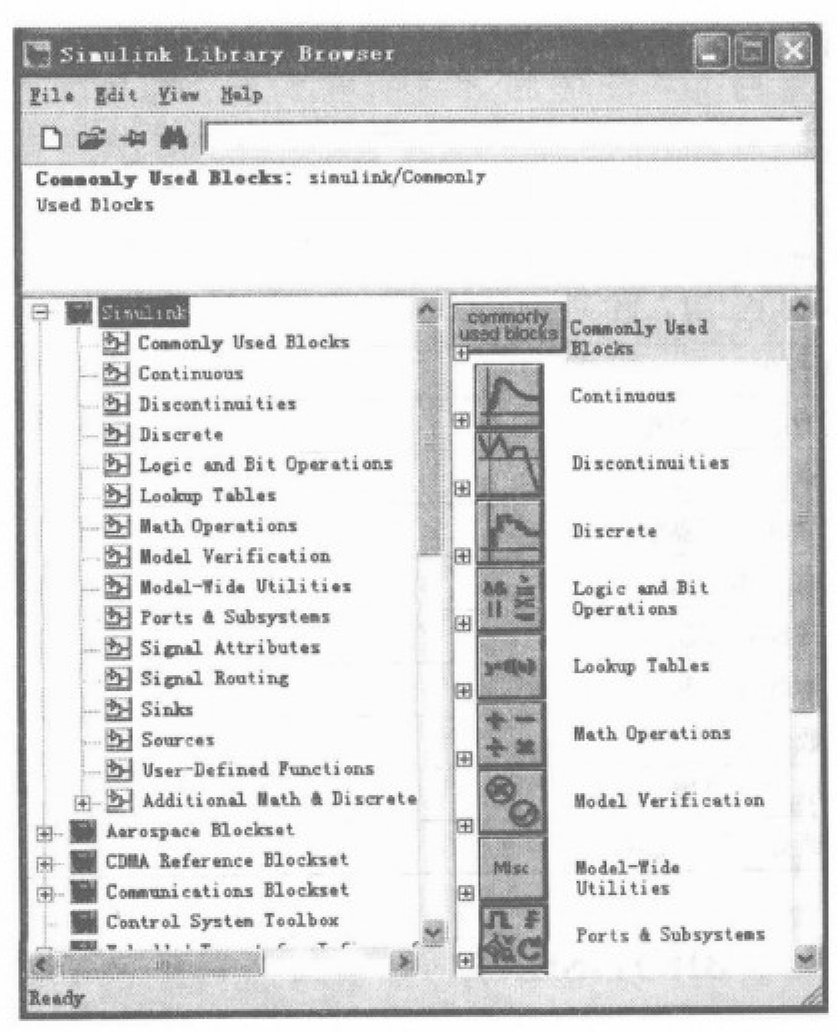


图 2-3 模型库浏览器窗口之一

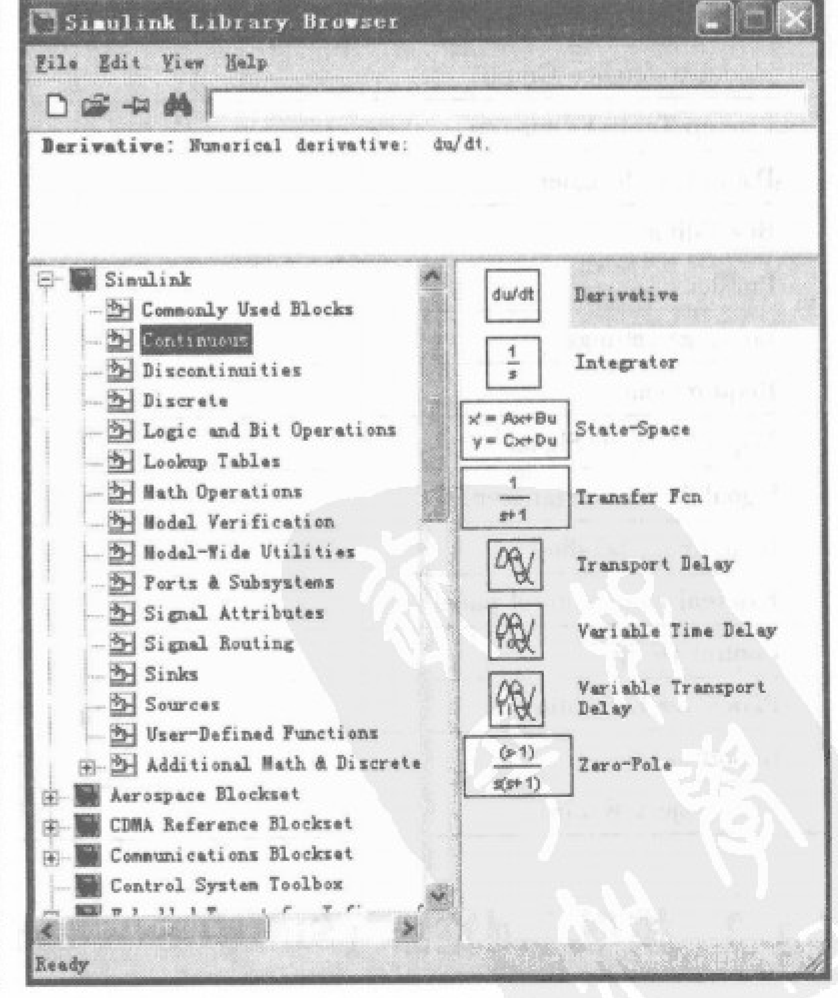


图 2-4 模型库浏览器窗口之二

利用窗口中的滚动条可以搜索SIMULINK的所有模型库，随着SIMULINK版本的更新，模型库内容在不断地增加，SIMULINK模型库在软件安装时可以选择。

2. 有关模块的基本操作

有关模型库模块的操作很多，这些操作都可以用菜单功能和鼠标来完成，这里仅介绍一些主要的、常用的操作。

（1）模块的提取　用SIMULINK对系统进行仿真，首先第一步就是将需要的模块从模型库中提取出来，并放到SIMULINK的仿真平台上去（SIMULINK窗口的中间空白区）。其方法二：

1）在模型浏览器窗口选中需要的模块（鼠标点击），选中的模块名会反色，然后在菜单“Edit”栏下选“Add to current model”，这时选中的模型会出现在SIMULINK的仿真平台上。

2）将光标指针移动到需要的模块上，按住鼠标左键，将模型图标拖拽到SIMULINK的平台上，然后松开鼠标即可，这是常用的快捷方法。

（2）模块的复制和粘贴　已经放到SIMULINK平台上的模块，如果系统中需要用到几个，则可以复制；如果要将平台上的模块或模型转移到另一个系统的仿真中使用，也可以采用复制的方法，其操作步骤如下：

1）将光标指针移动到需要的模块上，点击鼠标左键，模块的四角出现4个小黑块（■），表明该模块已被选中，然后在菜单“Edit”下选择复制命令（Copy），再用粘贴命令（Paste）就可以将它复制到其他地方。采用这种方法不仅可以复制一个模块，并且可以同时复制几个不同的模块，或者复制仿真模型的一部分乃至全部，然后转移到其他地方使用。如是后者，只需要按下鼠标左键拖拉鼠标，平台上即出现一个虚线的方框，松开鼠标，曾被虚框包围的所有模块四角都会出现小黑块（■），即已被选中，然后使用复制和粘贴命令就可以复制或转移到其他地方使用。

2）在同一模型中需要复制某一模块，可以用更简捷的办法，就是在选中模块的同时按下“Ctrl”键拖拉鼠标，选中的模块上会出现一个小“+”号，继续按住鼠标和“Ctrl”键不动，移动鼠标就可以将该模块拖拉到模型的其他地方，复制出一个相同的模块。同时该模块名后会自动加“1”，因为同一仿真模型中不允许出现两个模块名相同的模块。

3. 模块的移动、放大和缩小

为了使绘制的系统比较美观，需要将各个调用的模块放到合适的位置上，也需要调整模块的大小比例，可以进行如下操作：

1）移动模块仅需要将光标指针移到该模块上，点住鼠标左键，拖曳该模块到相应的位置即可。也可以在选中的模块后用键盘上的上、下、左、右键移动模块。

2）放大或缩小模块只需要在选中该模块后，将光标移到模块四角的小黑方块（■）上，这时光标变成双向小箭头，按下鼠标左键，按箭头方向拖拉，则可调节模块图标的外形大小。

4. 模块的转动

为了模块与模块之间的连线方便，有时需要转动模块的方向。转动模块的方向只需要在选中模块后，使用菜单“Format”栏下的“Flip block”和“Rotate block”两条命令，“Flip block”命令使模块水平反转，“Rotate block”命令使模块做90°旋转。

5. 模块名的修改和移动

在每个模块的下方都有一个模块名，模块名可以修改、移动和隐藏。修改模块名，首先用鼠标点击该模块名，点击后，模块名的外侧出现小框，“ | ”光标在框内闪烁，这时可以和文本文件一样，修改模块名称，模块名称可以是英文或中文。

模块名的放置位置可以调整，但只能是在模块的上方或下方，在点中模块名时不松开鼠标，直接将模块名拖拉到模块的上下方即可。如果不需要显示模块名，则首先选中模块，然后在菜单的格式栏下点击“Hide name”命令即可，这时模块名被隐藏起来。如果需要重新显示模块名，同样选中模块后，在格式栏下选择“show name”命令，隐藏的模块名会重新显示出来。

6. 模块的参数设置

SIMULINK 模型库里的模块放到仿真窗口之后，在使用前大多数模块都需要设置模块的参数。模块参数的设置很简单，只要将光标箭头移到模块图标上，双击鼠标左键，这时就会弹出参数对话窗口，如图 2-5 所示。图 2-5 中在仿真平台上有一个传递函数的模块，双击该模块，就弹出了模块的对话框，框中上部是模块功能的简要介绍，下面是模块参数设置栏，在设置栏中可以按要求键入参数。如果对参数设置有不清楚的地方，可以使用对话框下方的“Help”按钮取得帮助，这时会打开该模块的说明书。参数设置好后，点击“OK”按钮，对话框关闭，模块参数设置完毕。一般模块的参数设置都在系统的仿真模型画好后一起进行，模块的参数在仿真的进行过程中是不能修改的。

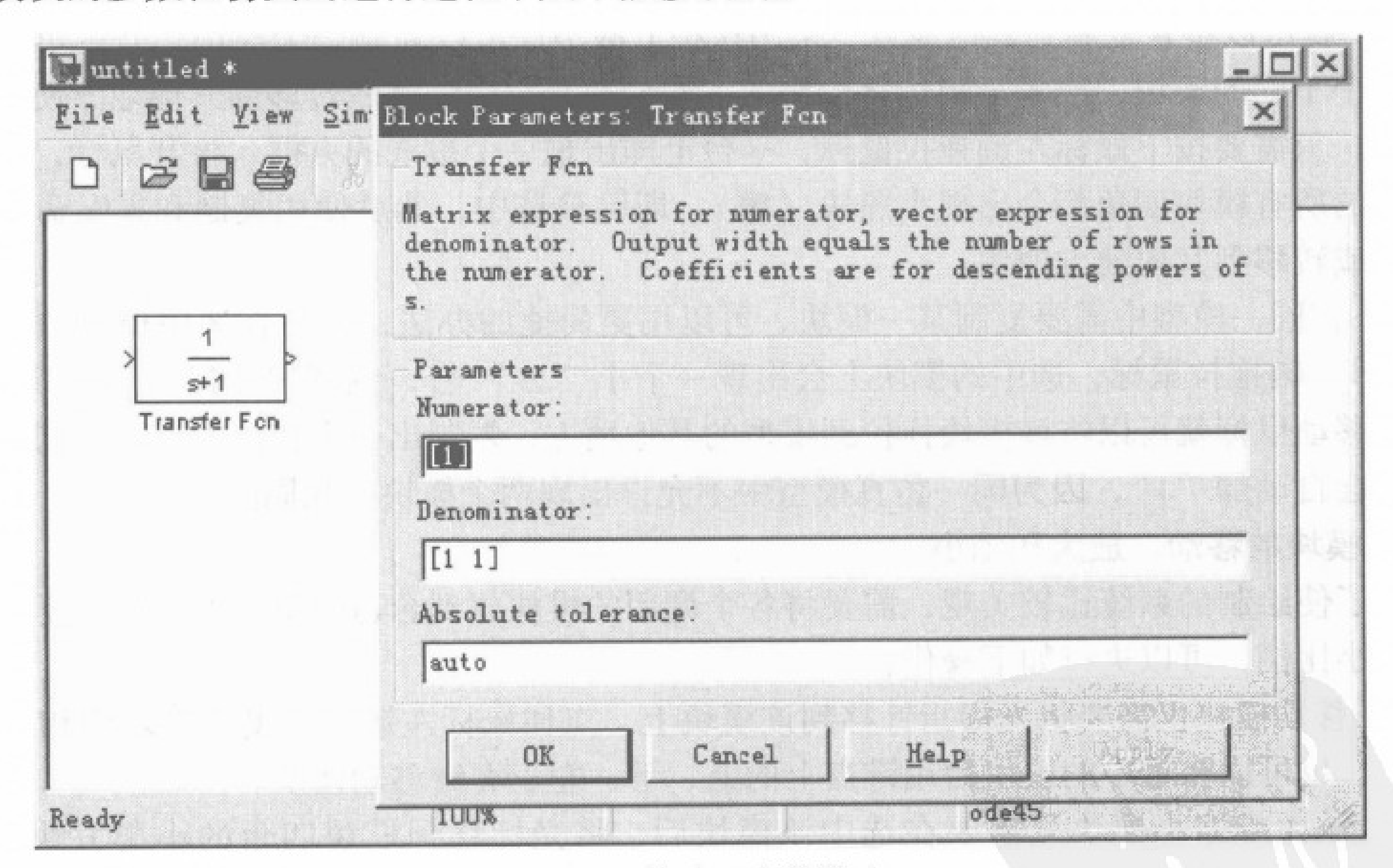


图 2-5　模块的参数设置

7. 模块的删除和恢复

对于放在平台上的模块，如果不再需要，可以将其删除，操作步骤是选中要删除的模块后，使用键盘的“Delete”键来删除。在模型浏览器中的模块是只读的，不能被删除。如果要删除已经构建模型的某一部分或全部，可以在要删除的部分上点鼠标左键拖拉出一个方框，框内的全部模块和连线将被选中，然后执行 Delete 操作，这部分模型（包括连线）就

被删除。

被删除的模块和内容可以用菜单中“Edit”下的“Undo”命令或快捷键恢复。

以上操作也可以使用鼠标右键，即在选中模块后点击鼠标右键，然后在打开的菜单中选择相应的选项。

8. 模块的连接

使用 SIMULINK 仿真，系统模型是由多个模块组成的，模块与模块间需要用信号线连接，连接的方法是：将光标箭头指向模块的输出端，对准后光标变成“+”字星，这时按下鼠标左键，拖曳“+”字星到另一个模块的输入端后松开鼠标左键，在两个模块的输出和输入端之间就出现了带箭头的连线，并且箭头表示了信号的流向（见图 2-6）。

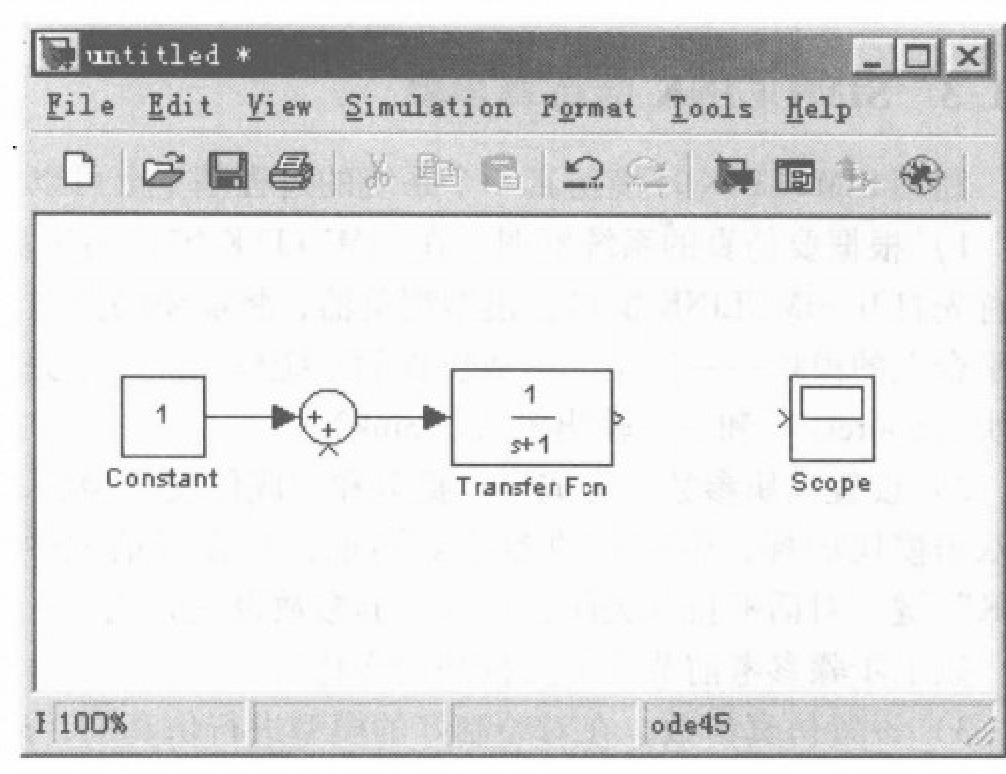


图 2-6　模块的连接之一

如果要在信号线的中间拉出分支连接另一个模块（见图 2-7），可以先将光标移向需要分岔的地方，同时按下 Ctrl 键和鼠标，可拖拉出一根支线，然后将支线引到另一输入端口，松开鼠标即可。

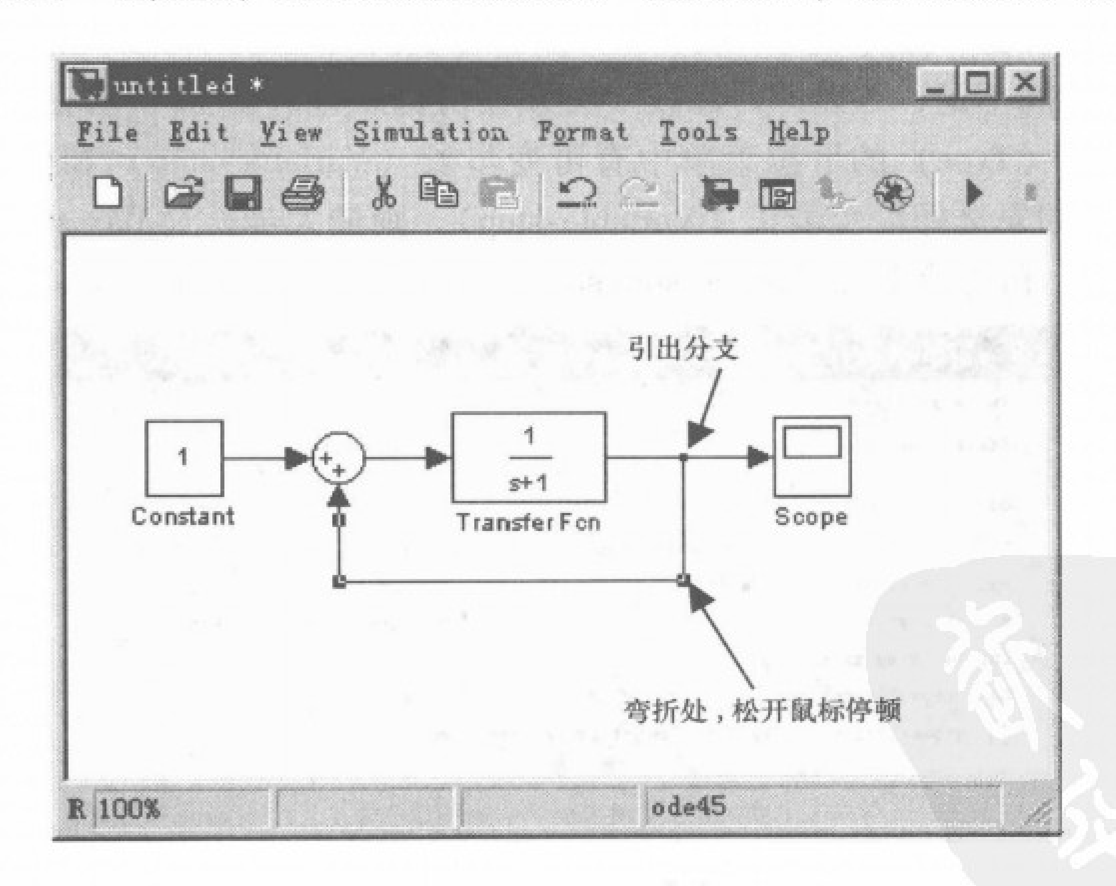


图 2-7　模块的连接之二

9. 信号线的弯折、移动和删除

如果信号线中间需要弯折（见图 2-7），只需要在拉出信号线时，在需要弯折的地方松开鼠标停顿一下，然后继续按下鼠标左键改变鼠标移动方向就可以画出折线。

要移动信号线的位置，首先是选中要移动的线条，将光标指向该线条后点击，线条上出现小黑块（见图2-7），表明该线已被选中，然后再将光标指向线条上需要移动的那一段，拖拉鼠标即可。

删除已画好的信号线也只要在选中信号线后，按“Delete”键即可删除。

2.1.3 SIMULINK 的仿真步骤

利用SIMULINK环境仿真一个系统的过程基本上可以分为如下几个步骤：

1）根据要仿真的系统框图，在SIMULINK窗口的仿真平台上构建仿真模型。这个过程要首先打开SIMULINK窗口和模型浏览器，将需要的典型环节模块提取到仿真平台上，然后将平台上的模块一一连接，形成仿真的系统框图。一个完整的仿真模型应该至少包括一个源模块（Sources）和一个输出模块（Sink）。

2）设置模块参数。完成模块提取和组成仿真模型后，需要给各个模块赋值。这时用鼠标双击模块图标，弹出模块参数对话框，并在对话框中输入模块参数，输入完成后点击“OK”键，对话框自动关闭，该模块的参数设置完成。

以上步骤参考前节“有关模块的操作”。

3）设置仿真参数。在对绘制好的模型进行仿真前，还需要确定仿真的步长、时间和选取仿真的算法等，也就是设置仿真参数。设置仿真参数可点SIMULINK窗口的菜单上的SIMULATION，在下拉的子菜单中点击“Configuration Parameters”命令或用“Ctrl + E”键。这时弹出仿真参数设置的对话框，如图2-8所示。对话框中有“Simulation time”，“Solver options”两栏。其中仿真时间（Simulation time）有开始时间（Start time）和终止时间（Stop time）两项，连续系统中仿真时间一般从零开始，仿真的终止时间可以先预设一个，在仿真过程如果预设的时间不足，可以即时修改（必须在仿真计算结束前）。算法选择（Solver options）中计算类型（Type）的下拉菜单中有可变步长（Variable-step）和固定步长（Fixed-step）两种选择，如果选择可变步长（Variable-step），则最大步长（Max step size）、最小步长（Min step size）和初始步长（Initial step size）都可以设为自动（auto）。在算法“Solver”

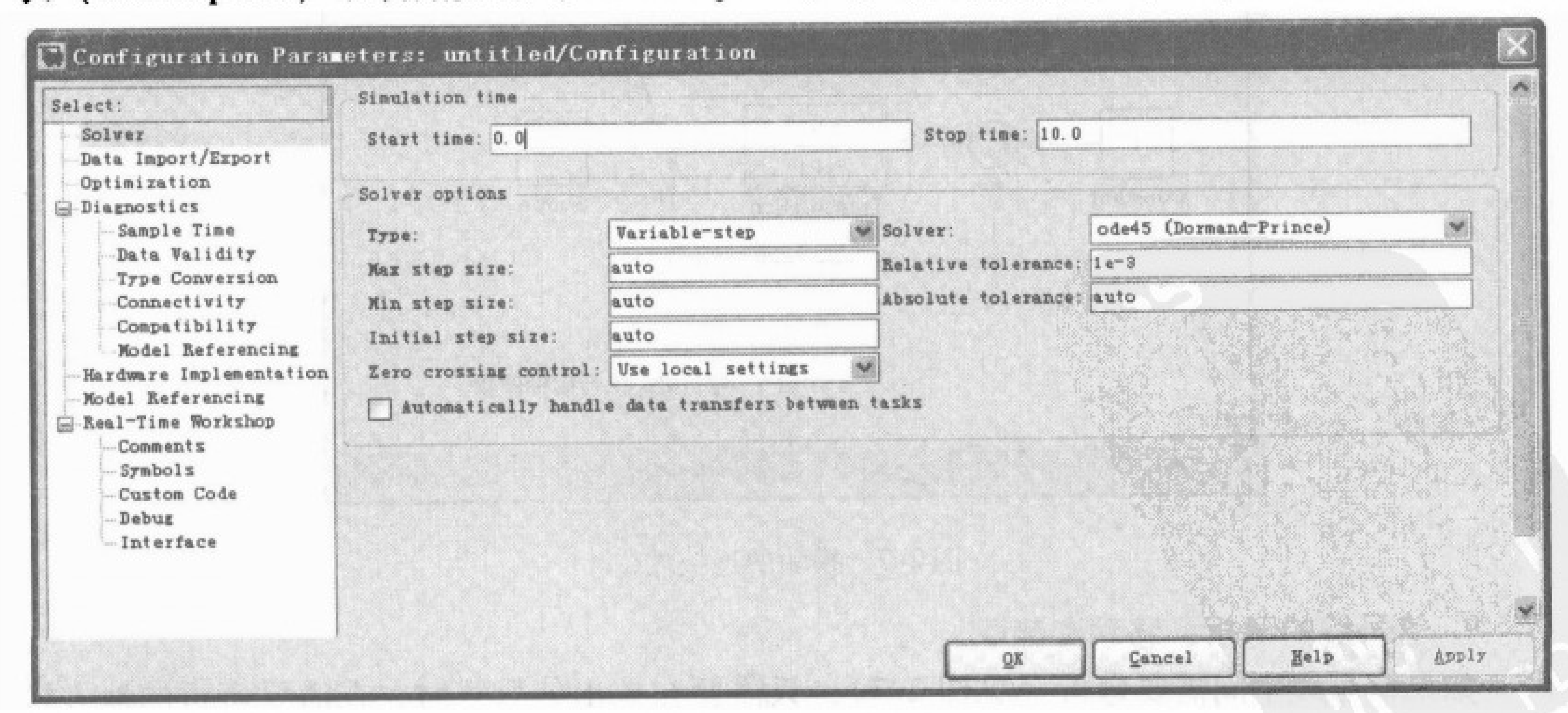


图2-8 仿真参数设置对话框

栏的下拉菜单中有多种数值计算方法可供选择，关于数值计算方法，将在后面作进一步介绍。该栏中经常还要设置是有仿真误差，有相对误差（Relative tolerance）和绝对误差（Absolute tolerance）两项，系统默认的相对误差是千分之一。选择合适的计算误差对仿真的速度和仿真计算能否收敛影响很大，尤其在仿真不能收敛时，适当放宽误差可以取得一定的效果，绝对误差一般可取“自动（auto）”。

4）启动仿真。在模块参数和仿真参数设置完毕后即可以开始仿真，在菜单“Simulation time”的子菜单中点击“Start”或用“Ctrl + T”键即可进入仿真，更简单的方法是使用工具栏上的按钮“▶”。在模型的计算过程中，窗口下方的状态栏会提示计算的进程，对简单的模型这仅在一瞬间就完成了。在仿真计算中途，如果要修改模块参数或仿真时间等，可以用“Simulation time”菜单中的“Pause”命令或按钮⏸暂停仿真。暂停之后要恢复仿真，则再次点击按钮“▶”，仿真就可以继续进行下去。如果中途要结束仿真，可以点击按钮“■”或使用“Simulation time”菜单中的“Stop time”命令来终止仿真。

5）观测仿真结果。在模型仿真计算完毕后，重要的是观测仿真的结果，在SIMULINK中最常用的观测仪器是示波器（Scope），这时只要双击该示波器模块，就可以打开示波器观察到以波形表示的仿真结果。

下面以两个例题来进一步说明仿真过程。

【例2-1】 仿真一阶惯性环节 $W(s)=\dfrac{1}{0.1s+1}$ 在单位阶跃给定下的响应。

步骤1：在SIMULINK的模型库中分别提取阶跃给定（Step）、惯性环节（Transfer Fcn）和示波器（Scope）三个模块，并连接组成仿真模型，如图2-9所示。

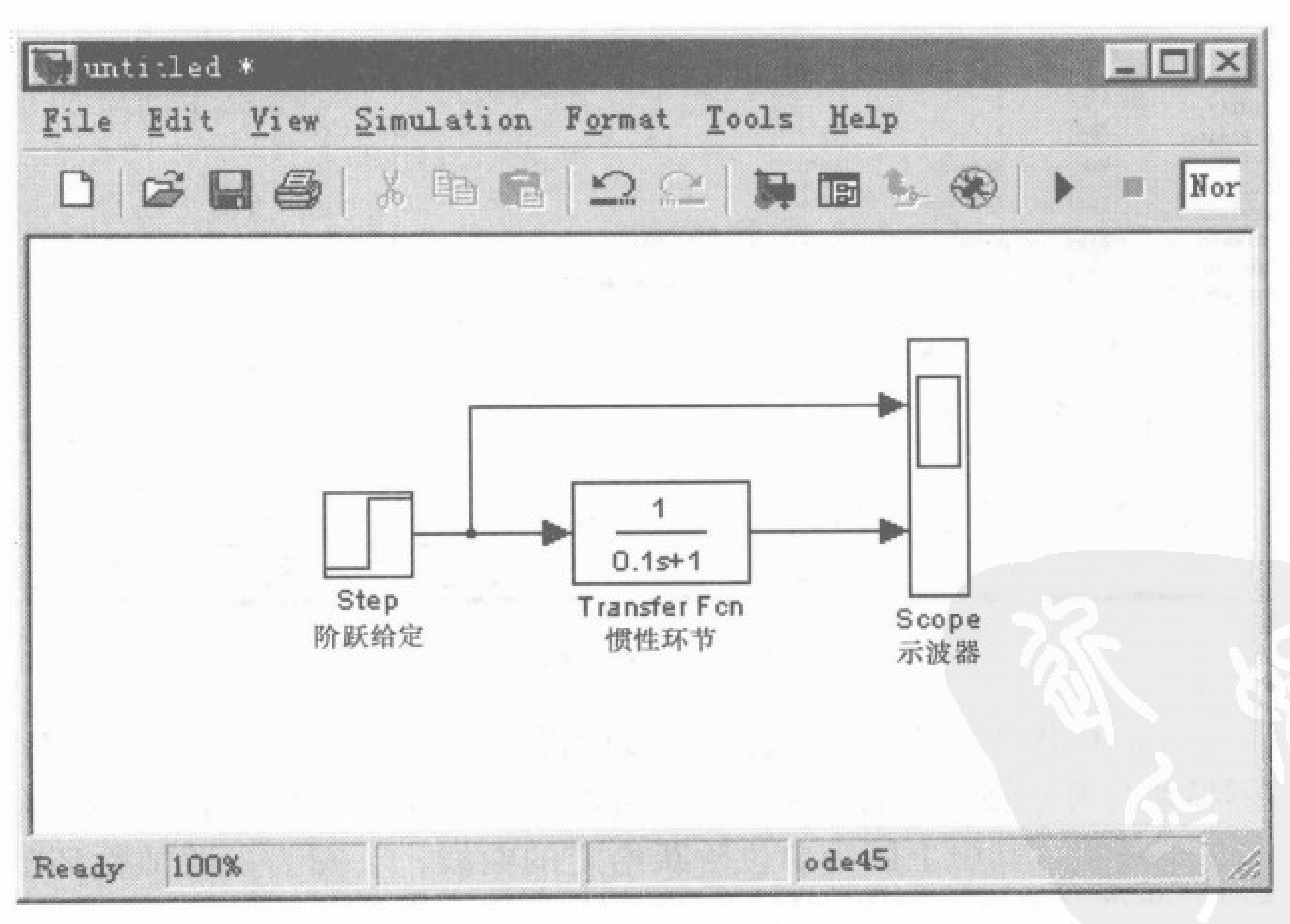


图2-9 一阶惯性环节仿真模型

步骤2：模块赋值。分别双击阶跃给定和传递函数两个模块，打开模块对话框，然后在框中设定其参数（见图2-10和图2-11）。



图 2-10　阶跃给定模块参数

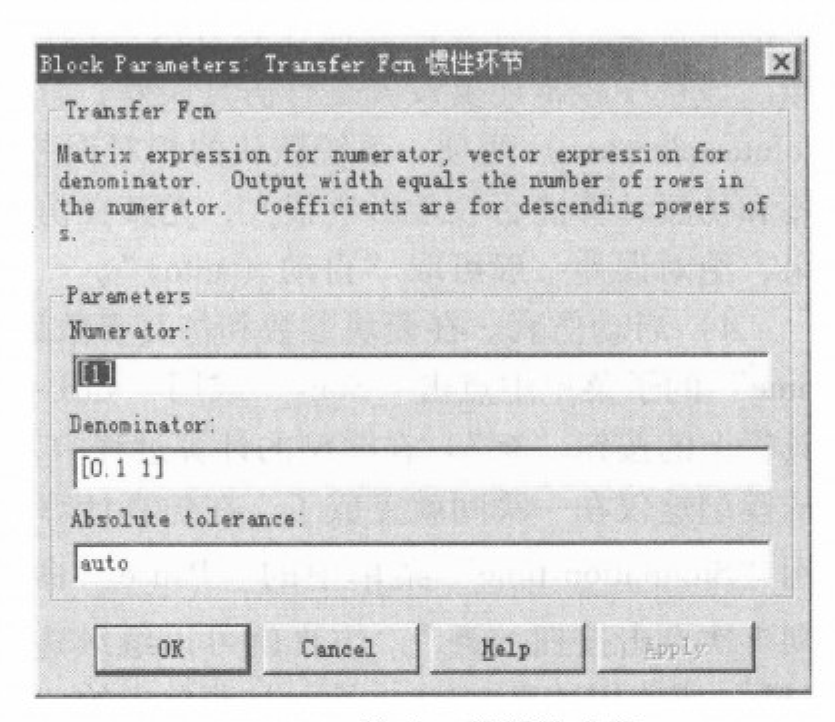


图 2-11　传递函数模块参数

步骤 3：设置模型仿真参数。在 Simulation 菜单下用 Configuration parameters 命令打开仿真参数对话框，如图 2-12 所示，在对话框中仅设置开始时间为 0.8s 和终止时间 1.6s，其他参数保持默认值。这里要说明的是在 0.8s 之前系统的仿真解算过程并不是不进行，而是开始时间 0.8s 之前的仿真结果不予记录而已。

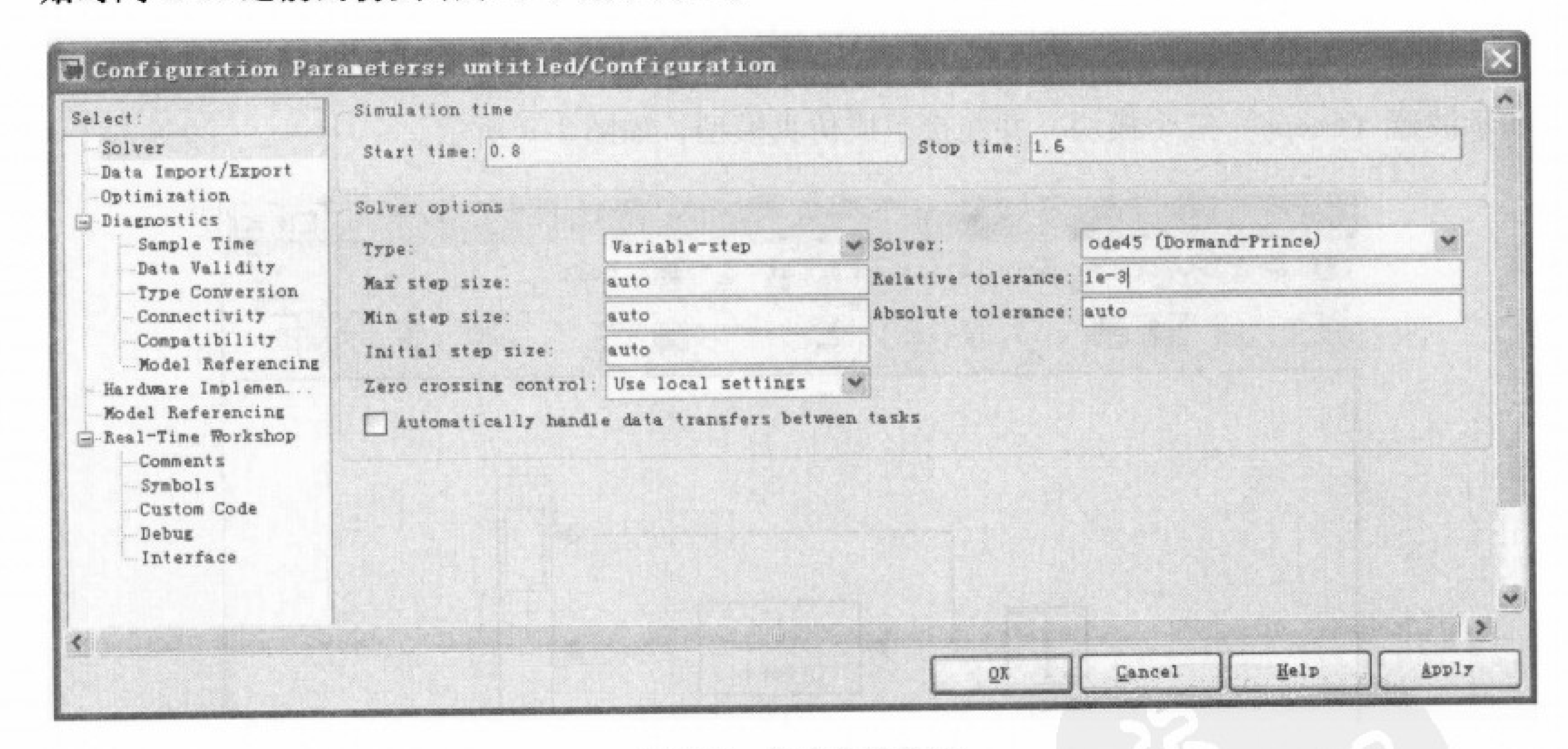


图 2-12　仿真参数设置

步骤 4：启动仿真并观察结果。在仿真参数设置完成后，点击按钮“▶”启动仿真，然后双击示波器模块打开示波器，打开示波器后可以看到一阶惯性环节对单位阶跃给定的响应曲线，如图 2-13 所示，其中上图为单位阶跃给定的曲线，下图为一阶惯性环节的输出响应，可以看到在阶跃给定下，一阶惯性环节的输出是按指数曲线上升的，并且记录是从 0.8～1.6s。

【例 2-2】　转速反馈有静差直流调速系统的稳态结构如图 2-14 所示，仿真该系统的稳态特性。已知直流电动机额定参数为 220V、55A、1000r/min，电动势常数 $C_e = 0.193\text{V} \cdot$

min/r，晶闸管整流器放大倍数 $K_s = 44$，电枢回路总电阻 $R = 1\Omega$，转速反馈系数 $\alpha = 0.0116$。

仿真该系统稳态特性，首先在仿真平台上构建仿真模型，如图 2-15 所示，该模型与系统的结构图基本相同，电流 I_d 的加载过程用斜坡函数（Ramp）模块表示，也可以用例 2-1 中的阶跃函数 Step 模块，设定斜坡函数的起始时间和上升斜率，可以控制系统加载时刻和加载速度，用饱和模块（Saturation）限制负载电流的大小。模型中取加载起始时间为 0.1s，上升斜率为 100。模型中用示波器观察整流器输出电压、电动机转速和负载电流三项。

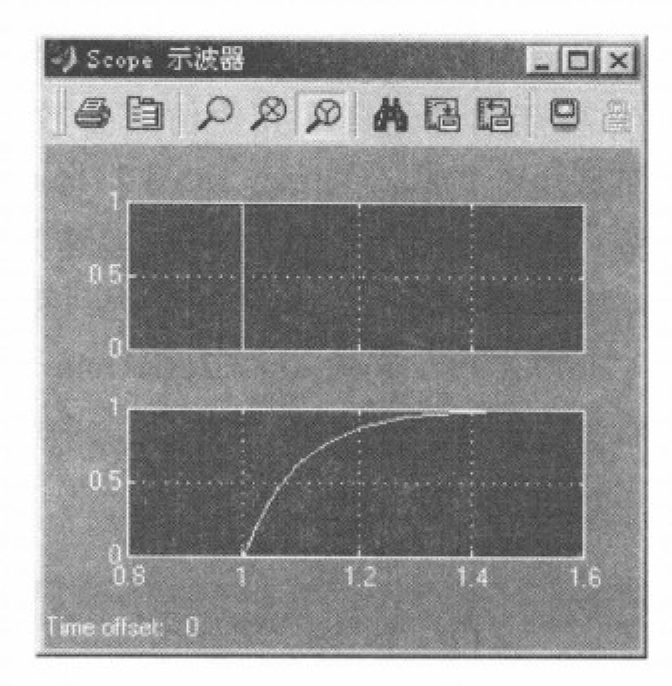


图 2-13　仿真结果

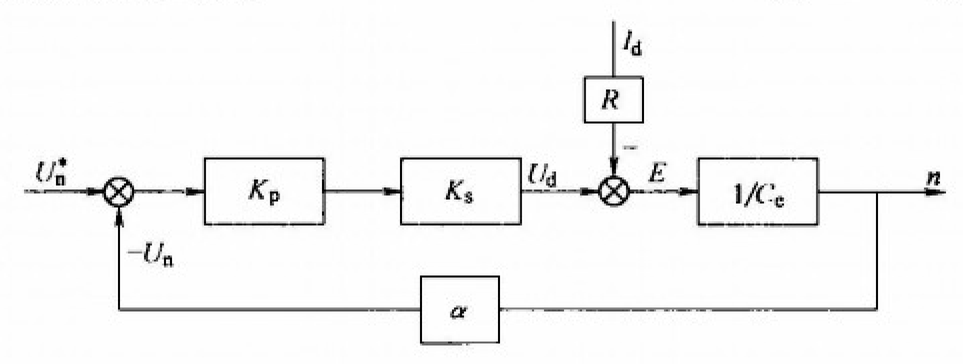


图 2-14　转速反馈直流调速系统稳态结构图

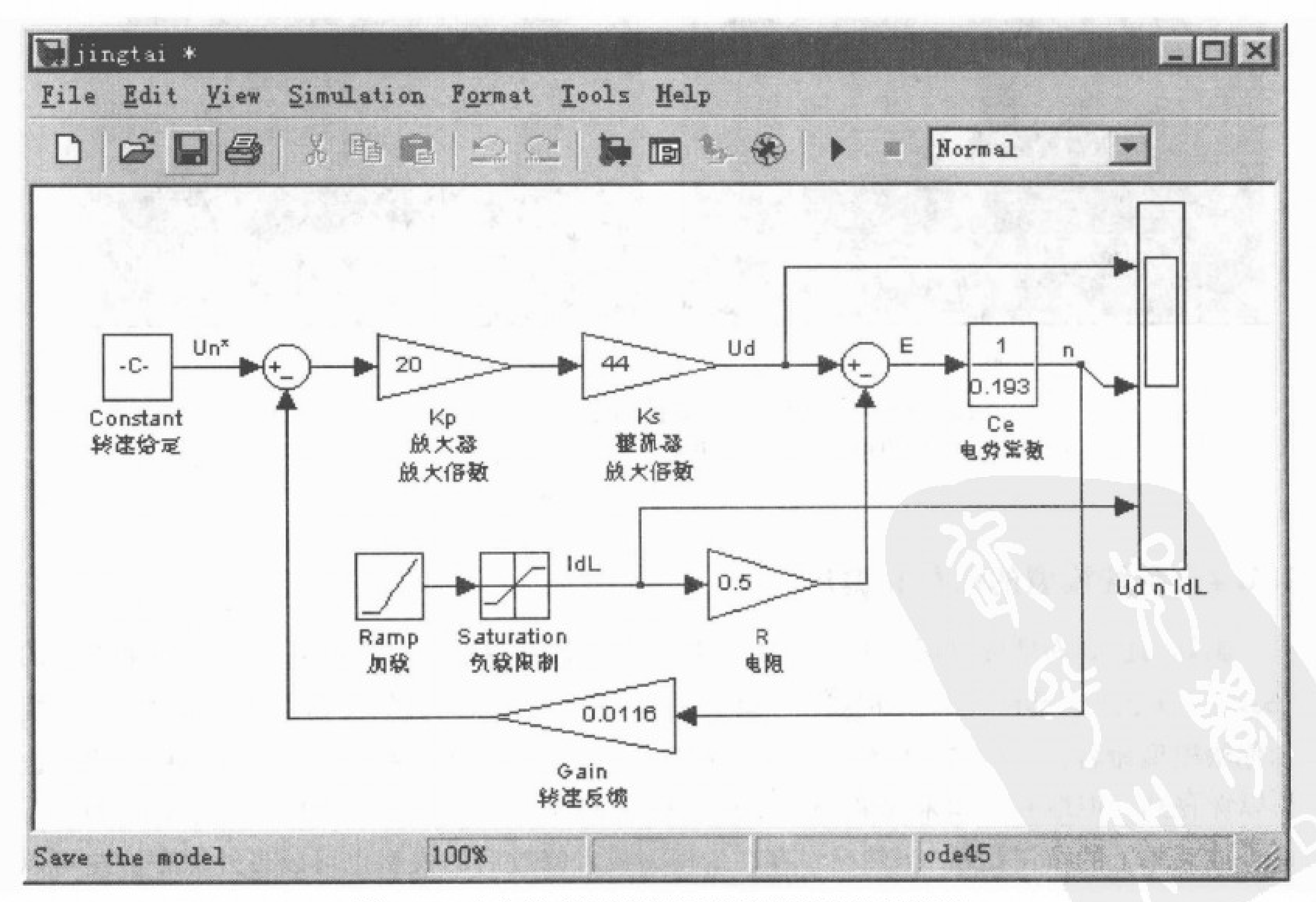
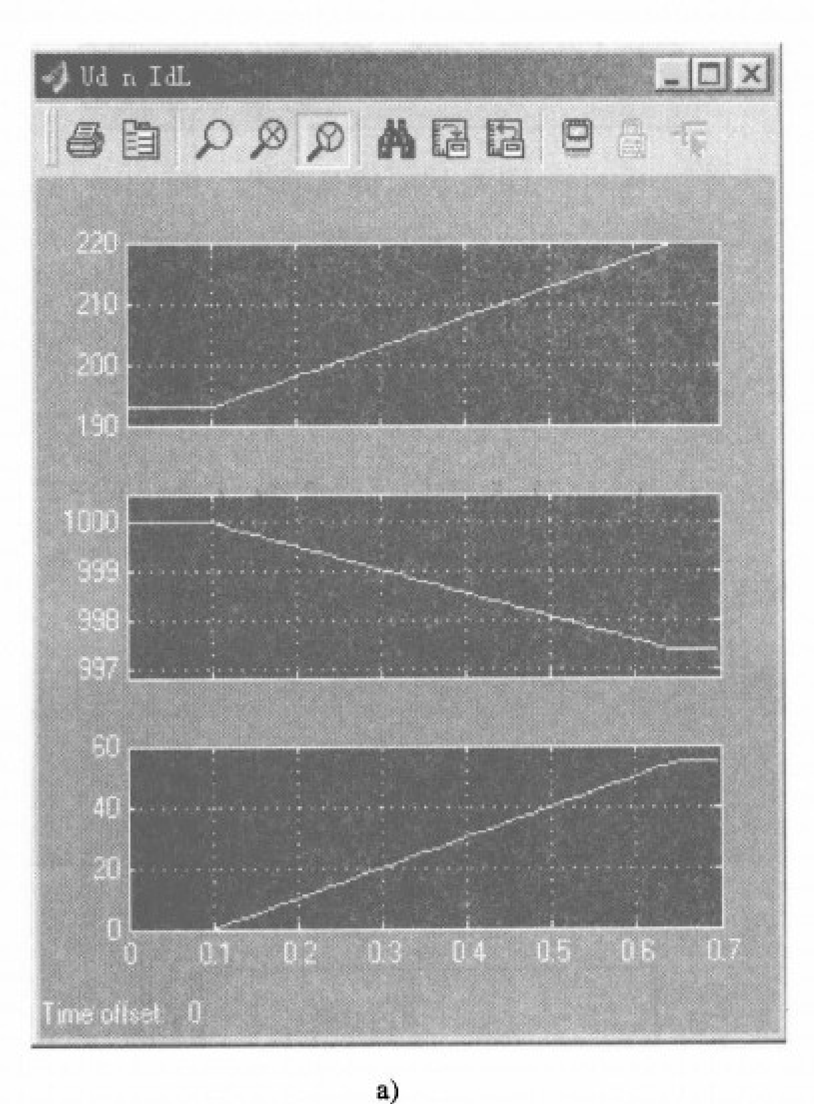
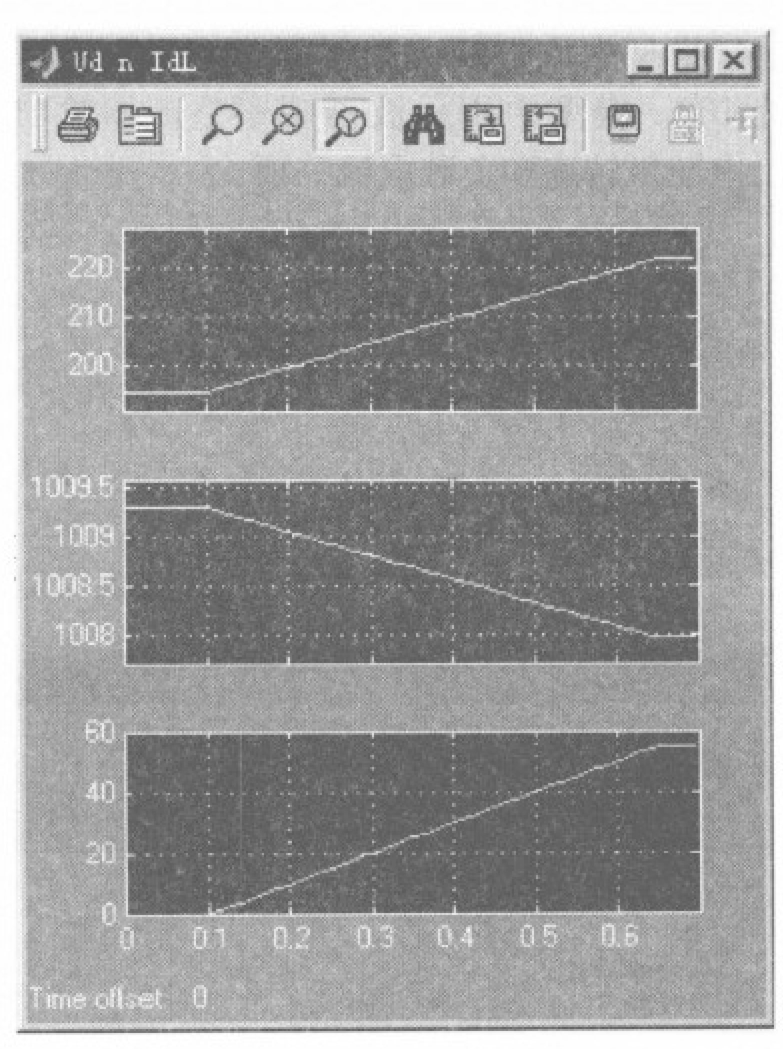


图 2-15　直流转速闭环调速系统稳态特性仿真模型

在模型中按已知条件代入模块参数，首次取放大器放大倍数 $K_p=20$，在设定仿真时间为 0.7s 后启动仿真（其他仿真参数保持默认值），然后打开示波器可以观察电压、转速和负载电流的稳态曲线，如图 2-16a 所示。在系统空载时，$I_{dL}=0$（下图 0.1s 前），整流器输出电压为 194V（上图），转速为 1000r/min（中图）。随着负载电流的增加，转速随之略有下降，在 0.64s 时电流达到额定值，这时的转速为 997.4r/min，系统的转速降为 $\Delta n=(2000-997.4)\mathrm{r/min}=2.6\mathrm{r/min}$。图 2-16b 是取 $K_p=40$ 时系统的特性，从转速曲线可以看到，随着放大倍数的增加，系统的转速降减小，静特性的硬度增加，抗负载扰动的能力提高。



a)



b)

图 2-16 单闭环有静差直流调速系统稳态特性整流器输出电压（上），转速（中），负载电流（下）
a）$K_p=20$ b）$K_p=40$

2.1.4 系统模型的保存和调用

画好的仿真模型可以保存起来，以便下次需要时直接调用，这可以使用 File 菜单下的“Save”命令或工具栏上的按钮。如果是一个新的、尚未命名的仿真模型，这时系统会提示你给模型命名，模型名的后缀为.mdl。模型一般保存在 MATLAB 的 Work 文档中，当然也可以保存到其他地方。如果要调用一个已经存在的模型，可以使用 File 菜单下的“Open”命令或菜单上的按钮。当然已经存在的模型或者修改后的模型也可以另外保存，这可以使用 File 菜单下的“Save as”命令，这时可以给模型定一个新的名字保存起来。

2.1.5 SIMULINK 的仿真算法

在 SIMULINK 的仿真过程中，选择合适的算法是很重要的，仿真算法是求常微分方程、传递函数、状态方程解的数值计算方法，这些方法主要有欧拉法（Euler）、阿达姆斯法（Adams）、龙格-库塔法（Rung-Kutta），这些算法都主要建立在泰勒级数的基础上。欧拉法是最早出现的一种数值计算方法，它是数值计算的基础，它用矩形面积来近似积分计算，欧拉法比较简单，但精度不高，现在已经使用较少。阿达姆斯法是欧拉法的改进，它用梯形面积近似积分计算，所以也称梯形法，梯形法计算每步都需要经过多次迭代，计算量较大，采用预报—校正后迭代只要一次，计算量减少，但是计算时要用其他算法计算开头的几步。龙格-库塔法是间接使用泰勒级数展开式的方法，它在积分区间内多预报几个点的斜率，然后进行加权平均，用作计算下一点的依据，从而构造了精度更高的数值积分计算方法。如果取两个点的斜率就是二阶龙格-库塔法，取四个点的斜率就是四阶龙格-库塔法。

SIMULINK 汇集了各种求解常微分方程数值解的方法，这些方法分为两大类，可变步长类算法和固定步长类算法。

1. 可变步长类算法（Variable-step）

可变步长算法是在解算模型（方程）时可以自动调整步长，并通过减小步长来提高计算的精度。在 SIMULINK 的算法中，可变步长算法有如下几种：

（1）ode45（Dormand-Prince） 基于显式 Rung-Kutta（4，5）和 Dormand-Prince 组合的算法，它是一种一步解法，即只要知道前一时间点的解 $y(t_{n-1})$，就可以立即计算当前时间点的方程解 $y(t_n)$。对大多数仿真模型来说，首先使用 ode45 来解算模型是最佳的选择，所以在 SIMULINK 的算法选择中将 ode45 设为默认的算法。

（2）ode23（Bogacki-Shampine） 基于显式 Rung-Kutta（2，3）、Bogacki 和 Shampine 相结合的算法，它也是一种一步算法。在容许误差和计算略带刚性的问题方面，该算法比 ode45 要好。

（3）ode113（Adams） 这是可变阶数的 Adams-Bashforth-Moulton PECE 算法，在误差要求很严时，ode113 算法较 ode45 更适合。ode113 是一种多步算法，也就是需要知道前几个时间点的值，才能计算出当前时间点的值。

（4）ode15s（stiff/NDF） 一种可变阶数的 Numerical differentiation formulas（NDFs）算法，它相对 backward differentiation formulas 算法（简称 BDFs 算法，也称 Gear 算法）较好。它是一种多步算法，当遇到带刚性（stiff）问题时或者使用 ode45 算法不行时，可以试试这种算法。

（5）ode23s（stiff/Mod. Rosenbrock） 一种改进的二阶 Rosenbrock 算法。在容许误差较大时，ode23s 比 ode15s 有效，所以在解算一类带刚性的问题时，用 ode15s 处理不行的话，可以用 ode23s 算法。

（6）ode23t（mod. stiff/Trapezoidal） 一种采用自由内插方法的梯形算法。如果模型有一定刚性又要求解没有数值衰减，可以使用这种算法。

（7）ode23tb（stiff/TR-BDF2） 采用 TR-BDF2 算法，即在龙格-库塔法的第一阶段用梯形法，第二阶段用二阶的 backward differentiation formulas 算法，从结构上讲，两个阶段的估计都使用同一矩阵。在容差比较大时，ode23tb 和 ode23t 都比 ode15s 要好。

(8) discrete (No continous states) 处理离散系统（非连续系统）的算法。

2. 固定步长类算法

顾名思义，固定步长算法在解算模型（方程）的过程中步长是固定不变的，在 SIMULINK 的算法中，固定步长算法有如下几种：

1) ode5 (Dormand-Prince)：采用 Dormand-Prince 算法，也就是固定步长的 ode45 算法。

2) ode4 (Rung-Kutta)：四阶的龙格-库塔法。

3) ode3 (Bogacki-Shampine)：采用 Bogacki-Shampine 算法。

4) ode2 (Heun)：一种改进的欧拉算法。

5) ode1 (Euler)：欧拉算法。

6) discre (No continous states)：不含积分的固定步长解法，它适用于没有连续状态仅有离散状态模型的计算。

在仿真过程中，用户要根据各种类型的模型的特点，各种数值积分方法的计算特点和适用范围，正确地选择恰当的算法，而这一点往往是使用者难于掌握的，现在还没有一种对所有模型都适用的算法，一个简单的办法是当一种算法不能完成模型的计算时选用另一种算法试试，毕竟 SIMULINK 已经编入了当今主要的各种数值计算方法，如果还是不行，那就要对模型或参数作一定的修改了。在电力电子电路和调速控制系统仿真中一般都使用可变步长算法。

2.1.6 示波器（Scope）的使用和数据保存

Sinks 模型库中有各种仪器仪表模块，用来显示和记录仿真的结果，在仿真的模型图中必须有一个这样的模块，否则在启动仿真时会提示模型不完整。在这些仪器中，示波器（Scope）是最经常使用的，示波器不仅可以显示波形，并且可以同时保存波形数据。下面主要介绍示波器模块的使用。

双击示波器模块图标，即可以弹出示波器的窗口画面（见图 2-17）。在画面上有一栏工具按钮，点击这些按钮，就可以得到相应的功能。

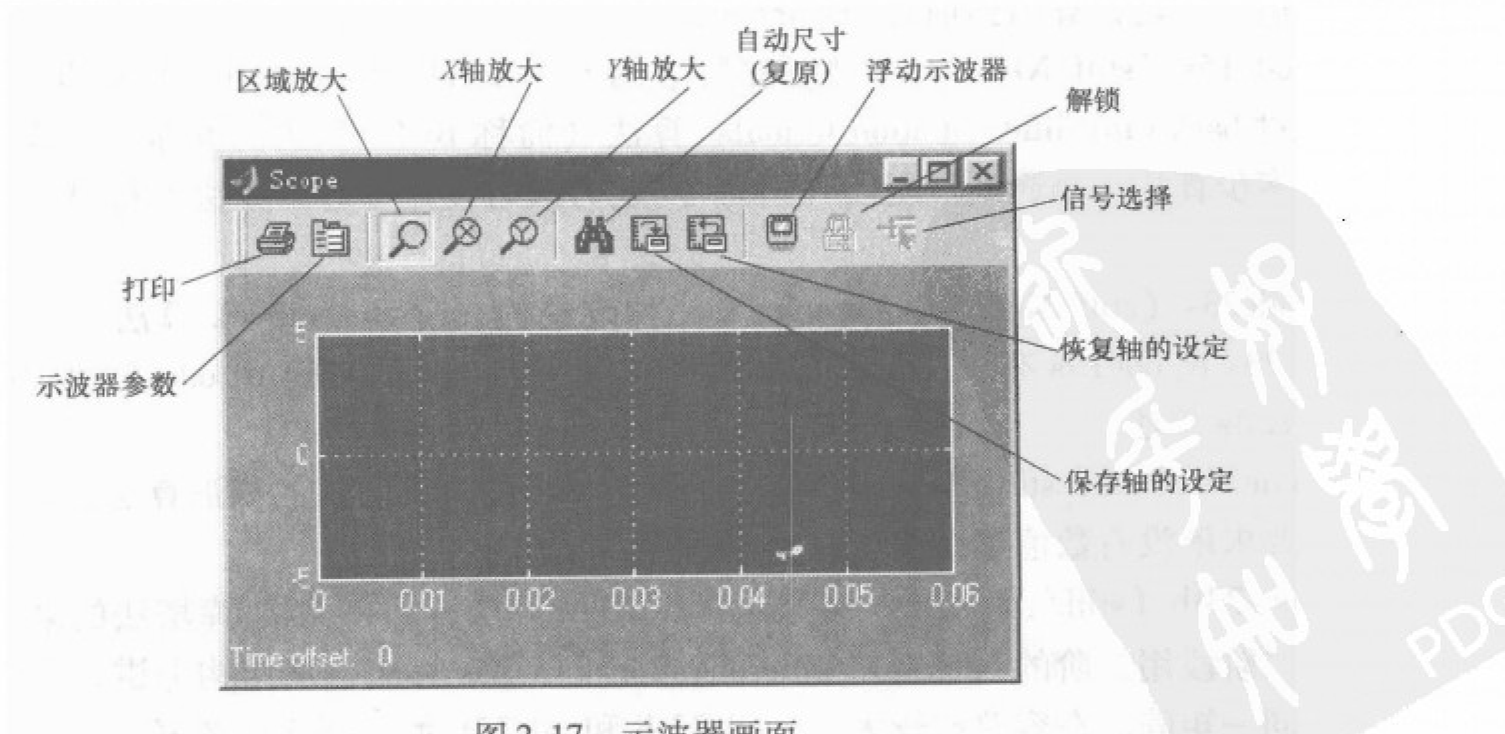
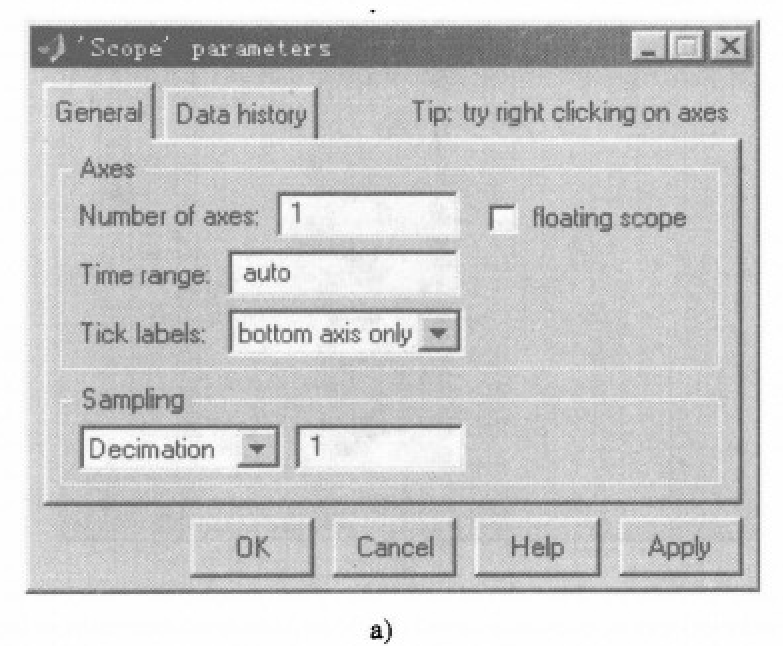


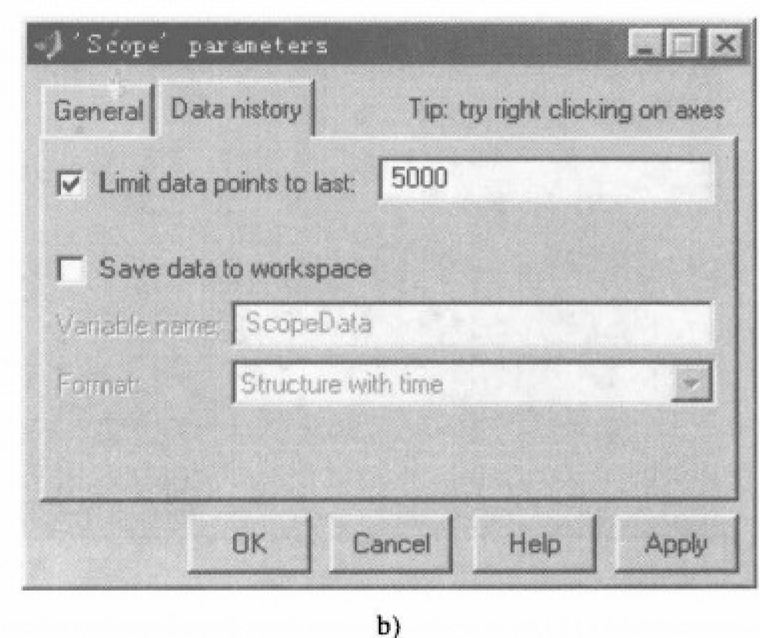
图 2-17 示波器画面

1. 示波器的参数

点击示波器参数按钮，弹出示波器参数设置的对话框（见图 2-18）。在参数设置第一页（General），Number of axes 项用于设定示波器的 Y 轴数量，即示波器的输入信号端口的个数，其预设值为“1”，也就是说，该示波器可以用来观察一路信号，将其设为“2”则可以同时观察两路信号，并且示波器的图标也自动变为有两个输入端口，依次类推，这样一个示波器可以同时观察多路信号。第二项 Time range（时间范围），用于设定示波器时间轴的最大值，这项一般可以选自动（auto），这样 X 轴就自动以系统仿真参数设置中的起始和终止时间作为示波器的时间显示范围。第三项用于选择标签的贴放位置。第四项用于选择数据取样方式，其中 Decimation 方式是当右边栏设为“3”时，每 3 个数据取一个，设为“5”时，则是 5 中取 1，设的数字越大，显示的波形就越粗糙，但是数据存储的空间可以减少。一般该项保持预置值“1”，这样输入的数据都显示，画出的波形较光滑漂亮。如果取样方式选 Sample time 采样方式，则其右栏里输入的是采样的时间间隔，这时将按采样间隔提取数据显示。该页中还有一项“floating scope”选择，如果将它左方的小框中点击选中，则该示波器成为浮动的示波器，即没有输入接口，但可以接收其他模块发送来的数据。



a)



b)

图 2-18　示波器参数设置

a）示波器设置第一页　b）示波器设置第二页

示波器设置的第二页是数据页，这里有两项选择。第一项是数据点数，预置值是 5000，即可以显示 5000 个数据，若超过 5000 个数据，则删掉前面的保留后面的。也可以不选该项，这样所有数据都显示，在计算量大时，对内存的要求高一些。如果选中了数据页的第二项“Save data to workspace”，即将数据放到工作间去，则仿真的结果可以保存起来，并可以用 MATLAB 的绘图命令来处理，也可以用其他绘图软件画出更漂亮的图形。在保存数据栏下，有两项设置：①保存的数据命名（Variable name），这时给数据起一个名，以便将来调用时识别。②选择数据的保存格式（Format），该处有三种选择：Arrary 格式适用于只有一个输入变量的情况，Structure with time 和 Structure 这两种格式适用于以矢量表示的多个变量情况，并且 Structure with time 同时保存数值和时间，Structure 仅保存数值。用 Arrary 格式保存的变量，为了以后可以用 MATLAB 命令重画，同时需要将时间也保存起来，这时可以在

模型平台上调用一个 Sources 模型库中的时钟模块（Clock），并将其连接一个示波器，用示波器的 Save data to workspace 功能将时间作为一个变量同时保存起来（见图 2-19）。

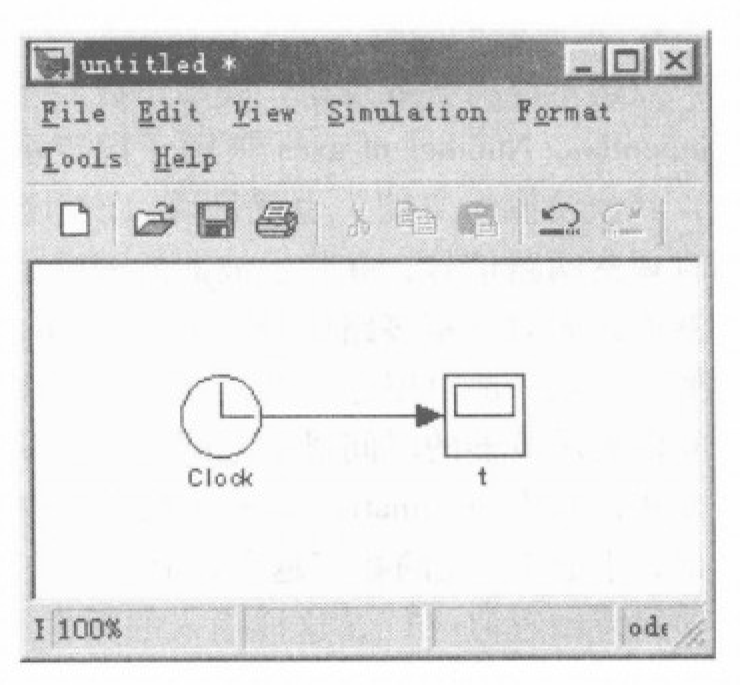
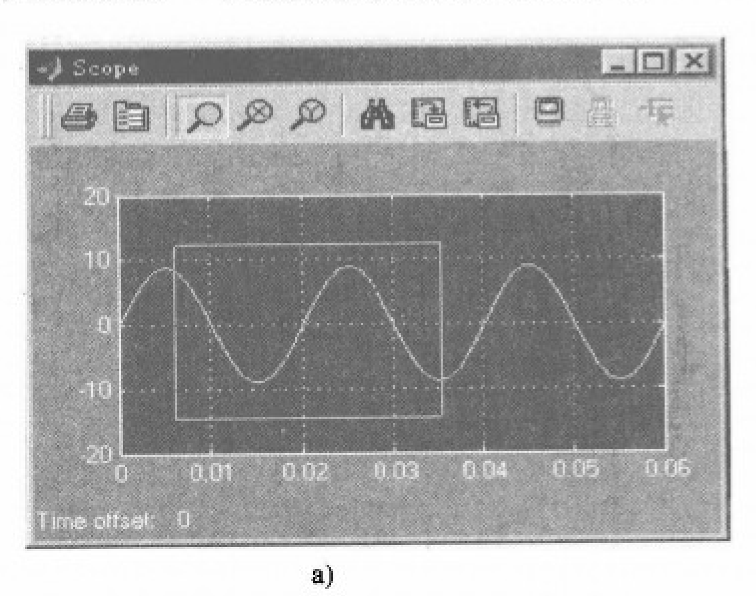


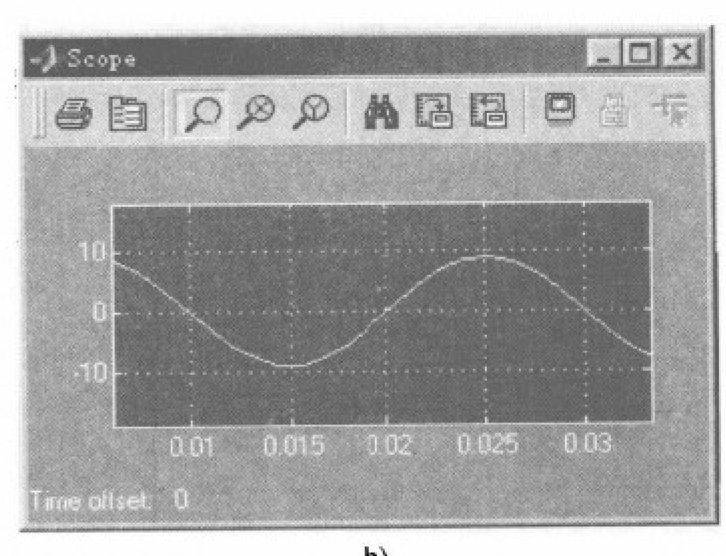
图 2-19　时间的保存

2. 图形缩放

在示波器窗口菜单上有三个放大镜，分别可以用于图形的区域放大、*X* 轴向和 *Y* 轴向的图形放大。区域放大，首先在菜单上点击区域放大镜，然后在需放大的区域上按下鼠标左键并斜向拖拉，这时出现一个矩形框，使矩形框框住需要放大的局部图形（见图 2-20a），松开鼠标，这部分图形就被放大了（见图 2-20b）。*X* 轴向和 *Y* 轴向的放大，同样只要在选择菜单上的相应放大镜后按下鼠标左键，并沿 *X* 轴方向或 *Y* 轴方向拖拉即可。如果要恢复原来的图形，只要点击一下望远镜图标就可以了。



a)



b)

图 2-20　图形的放大
a）选取放大区间　b）放大后的图形

3. 坐标轴范围

示波器显示的变量一般是时间的函数，所以图形的 *X* 轴一般是时间，*Y* 轴是对应的变量值。*X* 轴和 *Y* 轴的最大取值范围一般是自动设置的，利用放大镜功能可以在 *X* 轴和 *Y* 轴的范围内选取其中的一部分显示，但有时需要将 *Y* 轴的最大范围再扩大一些，以便使图形处于窗口的中间。这可以在 Scope 窗口的图形部分点击鼠标右键，在弹出的功能菜单中选择"axes properties…"项，则可以打开 *Y* 轴范围限制的对话框（见图 2-21），在对话框中重新设置 *Y* 轴范围，还可以给显示信号命名。

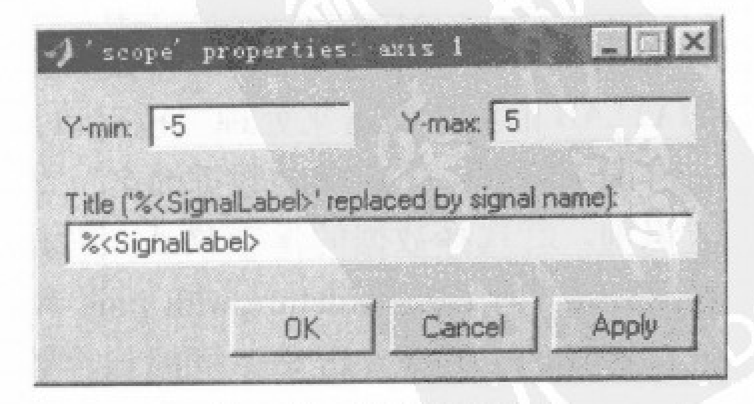


图 2-21　*Y* 轴范围设定

4. 浮动示波器（Floating scope）

浮动示波器是示波器使用的一项特殊功能，它不需要将示波器与外部模块用线连接，

就可以选择示波器的显示信号，使用是很方便的。将一个示波器变为浮动示波器，只要在示波器参数页上选中“floating scope”选项（见图 2-18a)，关闭参数对话框后，示波器图标的输入端口就没有了，这时该普通示波器就改变为一个浮动示波器。浮动示波器也可以从 Sinks 模型库中直接调用 Floating scope 模块，效果是相同的。在仿真模型图上放置一个浮动示波器模块后，双击模块图标出现示波器窗口，在窗口的图形区域用右键单击，在弹出的功能项中选择“Signal selection”栏，则可以打开信号选择对话框（见图 2-22)，对话框右边列出了可供显示的信号名称，在信号名前的□内打“√”，则可以在示波器上观察该信号。

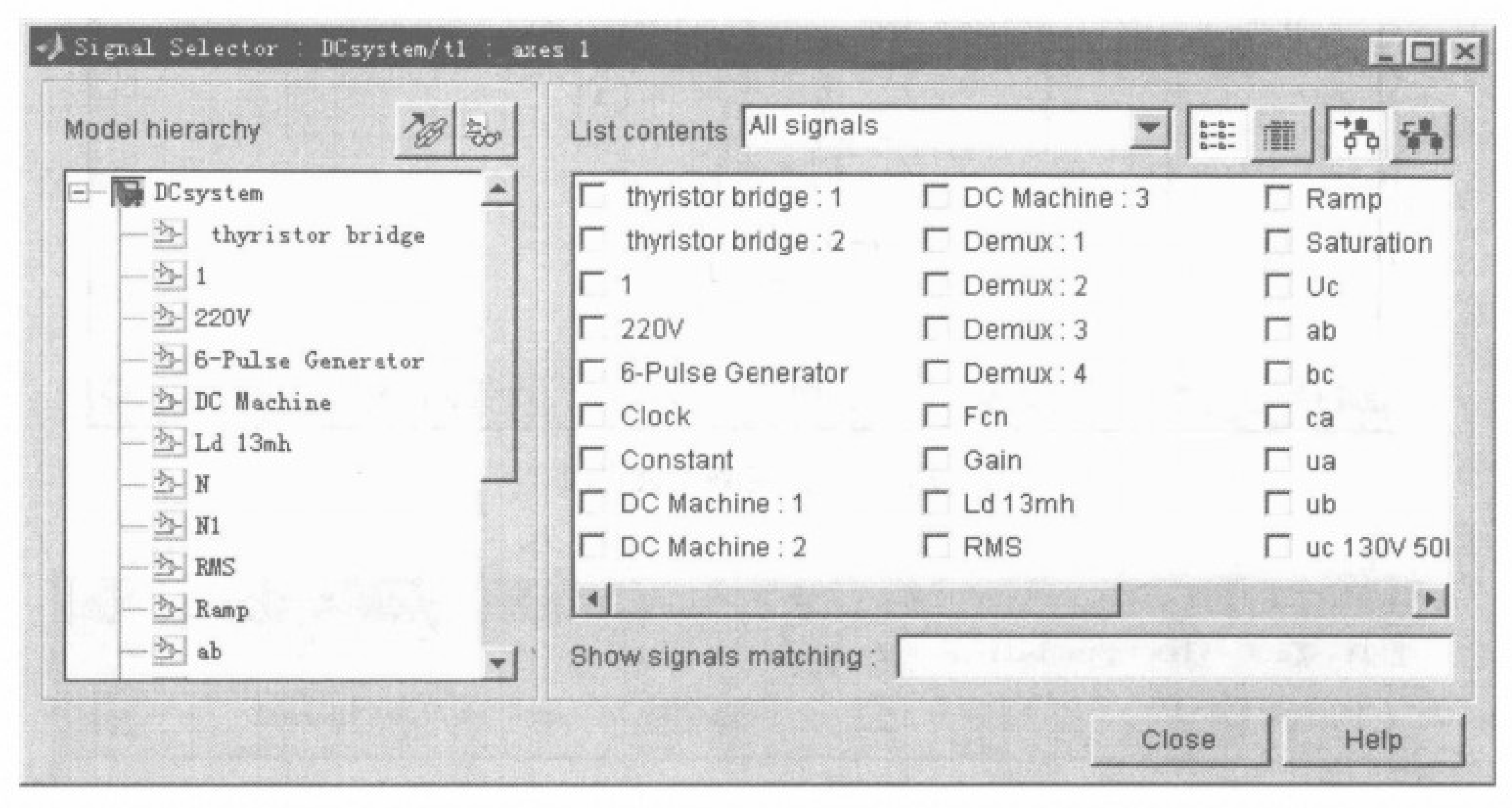


图 2-22　浮动示波器显示信号选择

2.1.7　建立子系统

1. 建立子系统（Subsystem）

在 SIMULINK 的仿真中，一个复杂系统的模型往往由许多基本模块组成，这么多模块及连线会使模型的画面显得很凌乱，甚至在一个平台上难于表达。这时 SIMULINK 提供了一个建立子系统（Subsystem）的功能，利用这项功能可以将模型局部的模块及其连线打包后用一个模块图标来表示，使模型画面变得简洁、明了，下面以一个例子来说明这项功能的使用方法。

图 2-23 是直流电动机的传递函数模型，现在需要将直流电动机的传递函数打包成为一个子系统模块。首先在模型平台上点一下鼠标拖拉出一个虚框，将需要打包的模块都包含在框内，松开鼠标，这时框内的模块和线条都被选中。然后在 Edit 菜单中选“Create subsystem”（创建子系统）命令，选择后画面变为图 2-24，这时图 2-23 中虚框内的模型部分就已经打包为一个子系统模块，模块名为 Subsystem，它有两个输入端和一个输出端。建立子系统后的模型可能不会像图 2-24 那样整齐，可以用移动模块和连线的方法重新调整。

建成的子系统模块可以重新命名，命名的方法与基本模块的命名相同。如果需要打开这

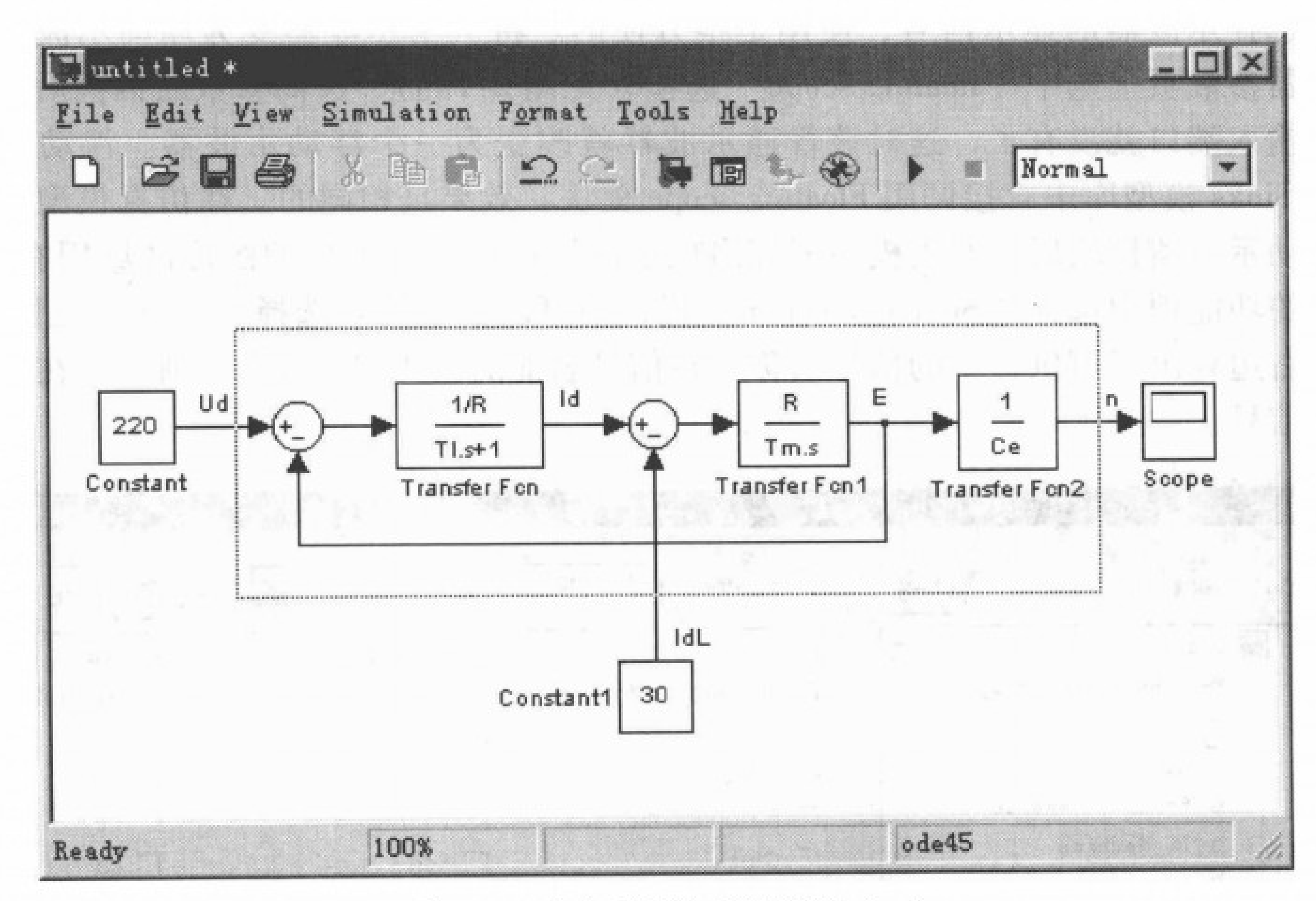


图 2-23　建立子系统功能说明（一）

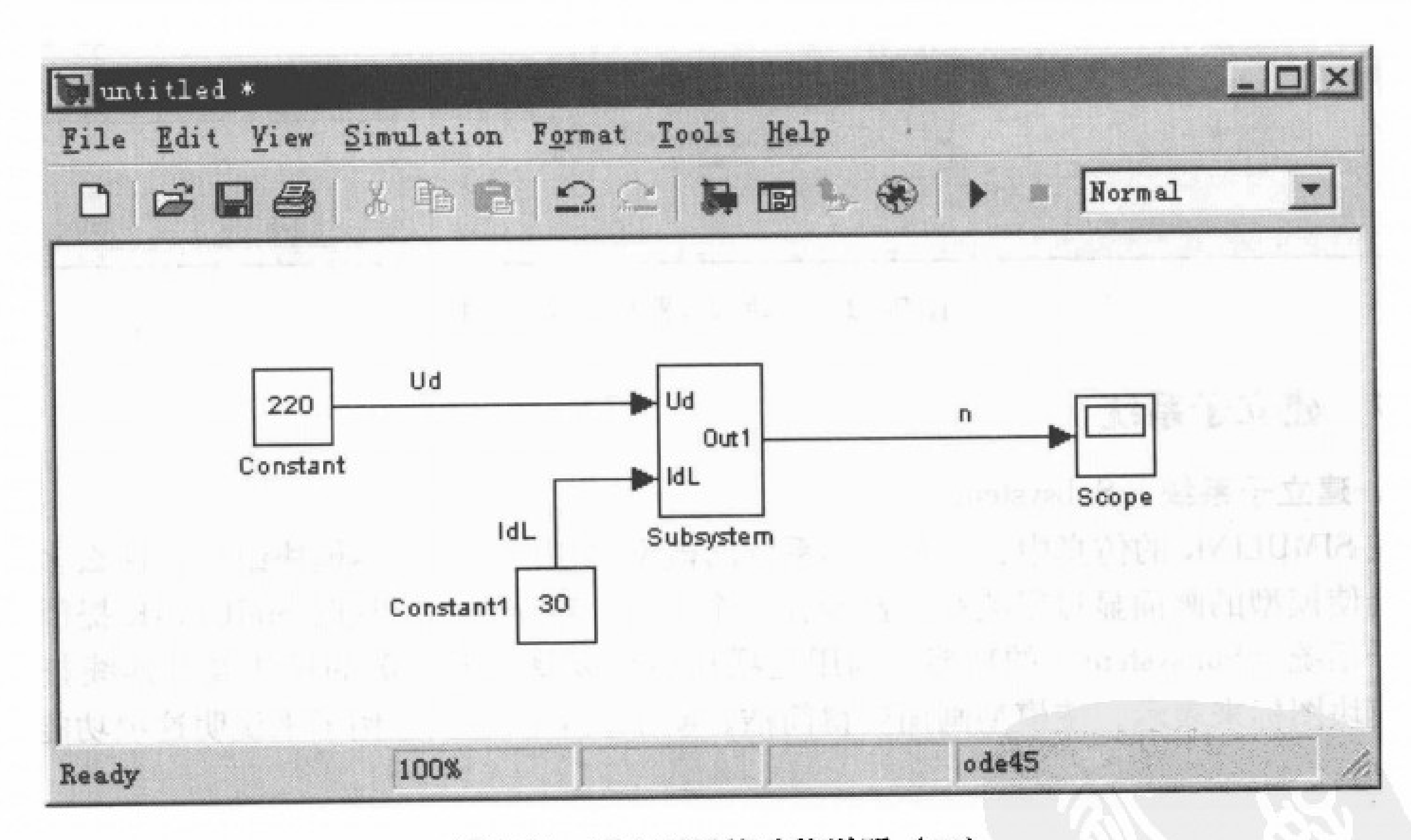


图 2-24　建立子系统功能说明（二）

个子系统模块，只要双击该子系统模块的图标就可以。重新打开的子系统如图 2-25 所示，打开子系统模块后，可以给子系统内的各模块设置参数以及做修改模块名称等操作。关闭子系统只要点击窗口右上角的关闭按钮。子系统关闭时，对子系统内模块做的参数设置和名称修改等也同时被保存下来。

子系统模型是允许嵌套的，也就是一个子系统内还可以包含有二级子系统模块，多层嵌套，可以组成很复杂的子系统。

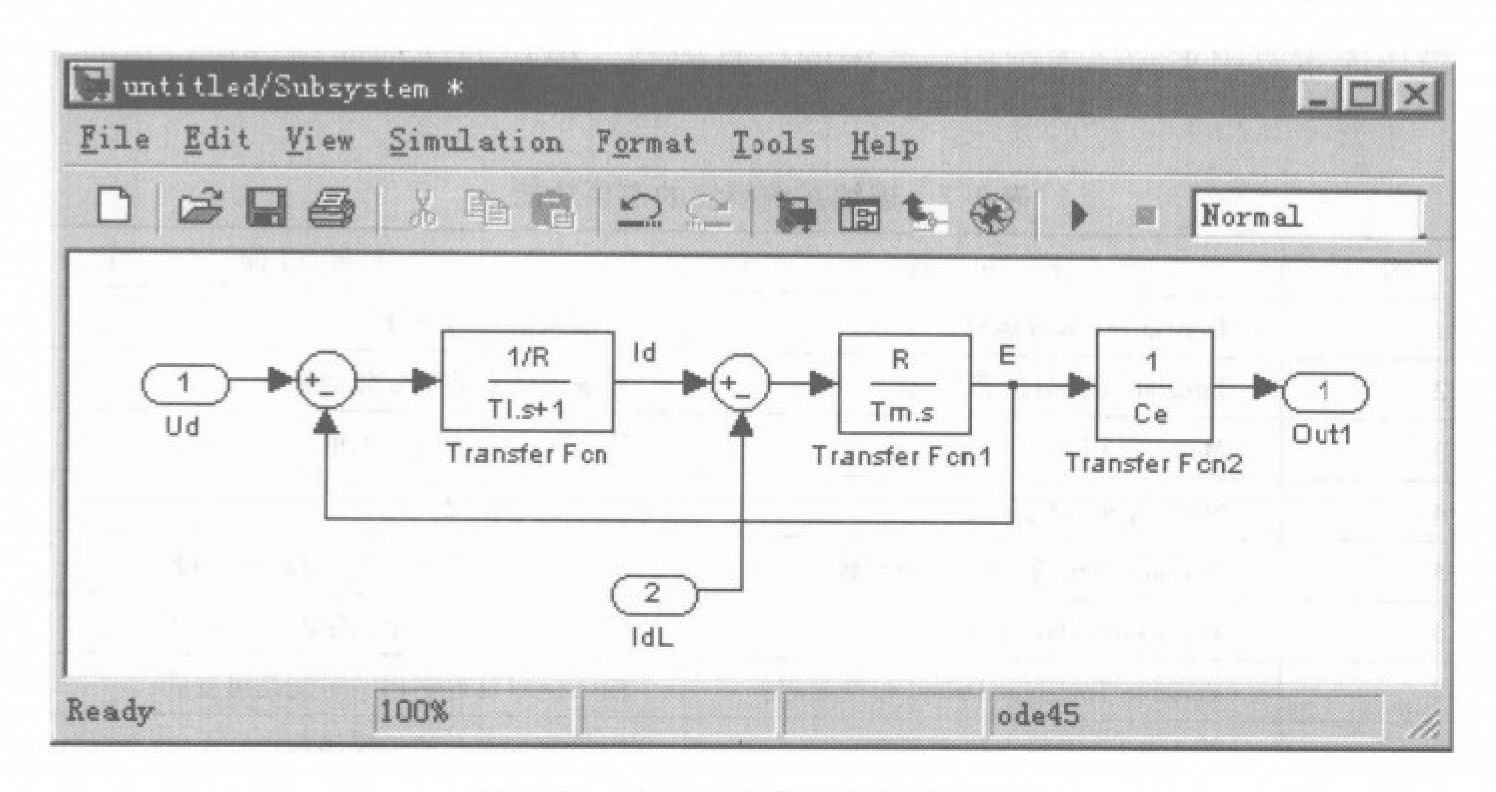


图 2-25 建立子系统功能说明（三）

子系统模块可以复制，并转移到其他仿真模型中使用，这和一般普通模块的复制、粘贴和移动是一样的。

2. 子系统模型的封装

在建立子系统后，若要给子系统内的模块设置参数，必须首先打开子系统，然后再逐个打开模块参数对话框输入参数。实际上给子系统赋值，往往只是要修改其中几个模块的某几项参数，现在要一一打开，显得很麻烦，尤其是含有嵌套的子系统。因此 SIMULINK 提供了子系统的封装（Mask）功能，也就是将子系统中各模块常要修改的参数集中在一张表上，方便子系统的使用。封装子系统需要在选中该子系统模块后，在模型窗口 Edit 菜单中选择“Mask subsystem”命令，就会弹出“Mask”编辑器窗口，然后在编辑器窗口内输入相关信息，更详细的操作请读者参看帮助（Help）文件。

实际上 SIMULINK 模型库中的大量基本模块（如 PID 模型等），也是由底层的基础模型组成的子系统，然后经 Mask 封装后得到的模块。

2.2 SIMULINK 模型库中的模块

在模型浏览器中，属于 SIMULINK 名下的模型有 9 大类（见图 2-3），其中激励源模型库（Sources）和仪器仪表库（Sink）是比较特殊的，这两个模型库里面的模块前者只有输出端口，后者只有输入端口。其他模型库的模块都同时有输入和输出两种端口，这些模块用来组成仿真系统的本体，而激励源模型库的模块则用来为仿真系统提供各种输入信号，仪器仪表库的模块则用于观测或记录系统在输入信号作用下产生的响应。随着 MATLAB 的发展，模型库的内容不断地扩大，各子模块库的内容和名称也有所调整，下面主要介绍一些常用模块。

2.2.1 连续系统子模块库

连续系统（Continuous）子模块库包含的子模块如图 2-4 所示，各模块的主要功能见表

2-7。该模块库主要用来构建连续控制系统的仿真模型，模块的详细使用方法可以查看帮助文件。

表 2-7 连续系统模块的主要功能

序　号	模　块　名	主 要 功 能
1	Derivative(微分运算)	对输入信号的微分运算
2	Integrator(积分运算)	对输入信号的积分分运算
3	Memory(记忆)	输出为上一步的输入值
4	State-Space 状态方程	建立状态方程
5	Transfer Fcn(多项式传递函数)	分子分母以多项式表示的传递函数
6	Transport Delay(延迟)	输入信号延迟一个给定时间后输出
7	Variable Transport Delay(可变延迟)	输入信号延迟输出的时间是可变的
8	Zero-Pole(零极点传递函数)	以零极点表示的传递函数

2.2.2 离散系统模块库

离散系统（Discrete）模块库包含的模块见表 2-8，模块的主要功能见表 2-9。离散系统库模块功能基本上与连续系统库相对应，不过是对离散信号的处理。

表 2-8 离散系统库模块图标和名称

$\frac{1}{z+0.5}$ Discrete Transfer Fcn	$\frac{(z-1)}{z(z-0.5)}$ Discrete Zero-Pole	$\frac{1}{1+0.5z^{-1}}$ Discrete Filter	y(n)=Cx(n)+Du(n) x(n+1)=Ax(n)+Bu(n) Discrete State-Space
离散传递函数	离散零极点传递函数	离散滤波器	离散状态方程
$\frac{T}{z-1}$ Discrete-Time Integrator	First-Order Hold	Zero-Order Hold	$\frac{1}{z}$ Unit Delay
离散时间积分器	一阶保持器	零阶保持器	单位延迟

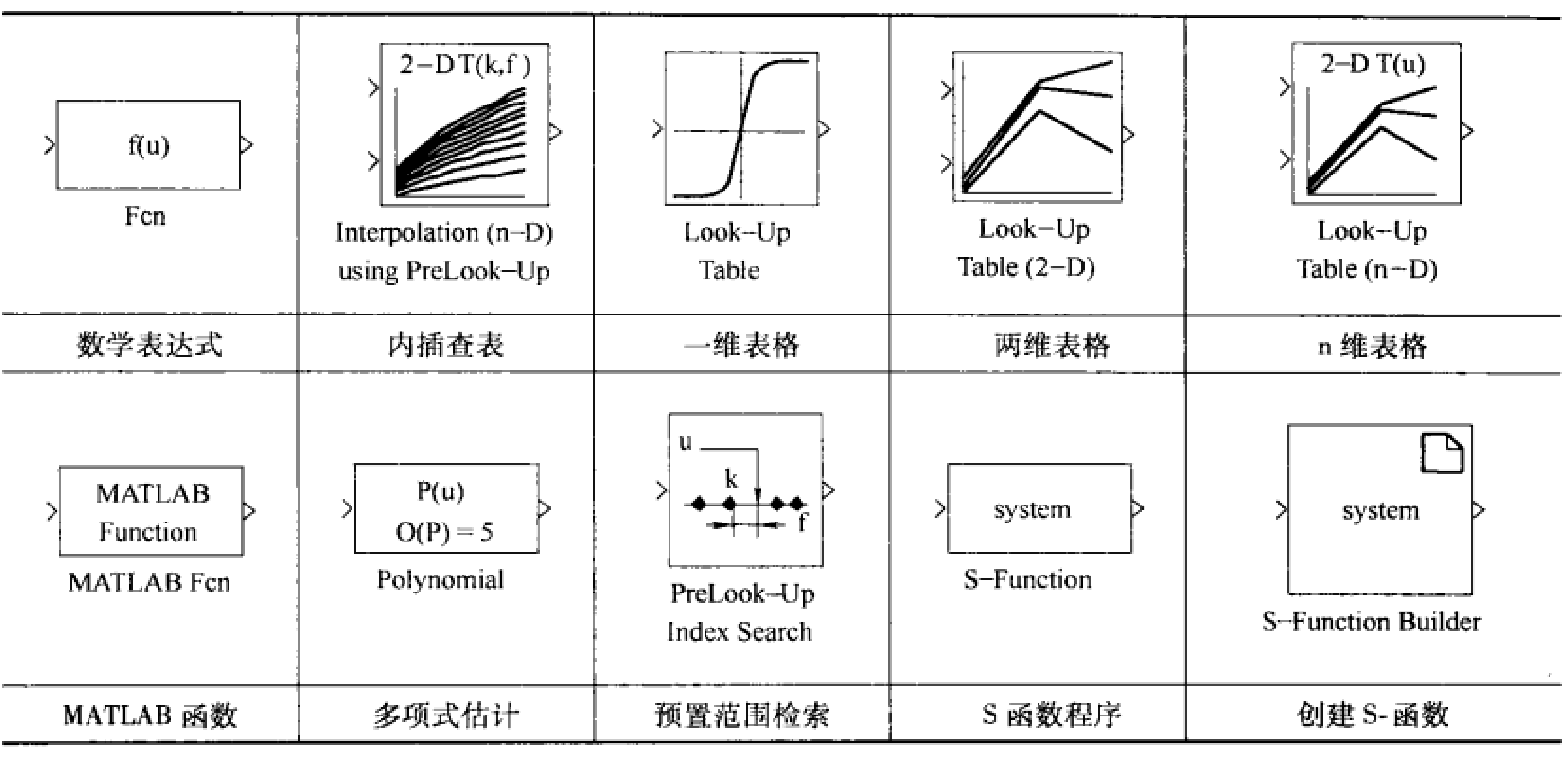
表 2-9 离散系统库模块功能

序　号	模　块　名	主 要 功 能
1	Discrete Transfer Fcn(离散传递函数)	表达一个离散的传递函数
2	Discrete Zero-Pole(离散零极点传递函数)	表达一个零极点形式的离散传递函数
3	Discrete Filter(离散滤波器)	建立一个离散的滤波器
4	Discrete State-Space(离散状态方程)	建立离散的状态方程
5	Discrete-Time Integrator(离散时间积分器)	输出为输入信号的离散时间积分
6	First-Order Hold(一阶保持器)	一阶保持器
7	Zero-Order Hold(零阶保持器)	零阶保持器
8	Unit Delay(单位延迟)	信号采样后保持一个采样周期后再输出

2.2.3　函数与表格模块库

使用函数和表格（Functions & Tables）库内的模块可以在系统模型中插入 M-函数、S-函数，以及各种方式建立的表格，使系统的仿真功能更强大。库中包含的模块见表 2-10，模块的简要功能说明见表 2-11。该模块库还不断有所增加。

表 2-10　函数与表格库模块



f(u) Fcn	2-D T(k,f) Interpolation (n-D) using PreLook-Up	Look-Up Table	Look-Up Table (2-D)	2-D T(u) Look-Up Table (n-D)
数学表达式	内插查表	一维表格	两维表格	n 维表格
MATLAB Function MATLAB Fcn	P(u) O(P) = 5 Polynomial	u k f PreLook-Up Index Search	system S-Function	system S-Function Builder
MATLAB 函数	多项式估计	预置范围检索	S 函数程序	创建 S-函数

表 2-11　函数与表格库模块功能

序号	模　块　名	主 要 功 能
1	Fcn(数学表达式)	自定义数学表达式
2	Interpolation (n-D) using Pre Look-Up (内插查表)	根据输入,用内插的方式得到输出,插值的方法可选常数内插和线性内插
3	Look-Up Table(一维表格)	建立多种形式的表格,根据输入查表决定输出
4	Look-Up Table(2-D)(两维表格)	
5	Look-Up Table(n-D)(n 维表格)	
6	MATLAB Fcn (MATLAB 函数)	调用 MATLAB 函数
7	Polynomial(多项式估计)	执行 MATLAB 的 polyval 命令
8	PreLook-Up Index Search (预置范围检索)	对于一组间断的数据,采用均匀间隔、线性或者二元检索的方法确定输出
9	S-Function(S 函数程序)	调用由 S-函数编写的程序
10	S-Function Builder(创建 S-函数)	调用一个打包的 S-函数或 C 语言编制的文件,并支持连续和离散的状态

2.2.4　数学运算模块库

数学运算（Math）模块库的模块用来完成各种数学运算，包括加、减、乘、除以及复数计算、逻辑运算等等。模块库图标和名称见表 2-12，模块功能见表 2-13。

表 2-12　数学运算模块库模块图标和名称

Abs	Dot Product	Gain	Logical Operator	Math Function	MinMax	Product
取绝对值	计算点积	放大器	逻辑运算	数学函数	取极值	乘法运算
Relational Operator	Sum	Trigonometric Function	Complex to Magnitude-Angle	Complex to Real-Imag	Magnitude-Angle to Complex	Real-Imag to Complex
比较运算	信号综合	三角函数	取复数模和复角	取复数的实部、虚部	模和复角以复数表示	实部、虚部以复数表示
Algebraic Constraint	Combinatorial Logic	Matrix Gain	Slider Gain	Matrix Gain	Sign	
代数环限制	逻辑真值表	矩阵增益	滑动增益	矩阵放大器	取输入信号的符号	

表 2-13　数学运算模块功能

序号	模　块　名	主 要 功 能
1	Abs(取绝对值)	取输入信号的绝对值或模
2	Dot Product(计算点积)	输出 y = sum(conj[u1] * u2)
3	Matrix Gain(矩阵放大器)	输出为输入信号乘增益
4	Logical Operator(逻辑运算)	与、或、非等逻辑运算符
5	Math Function(数学函数)	指数、对数、平方等数学运算
6	MinMax(取极值)	取输入信号的极大、极小值
7	Product(乘法运算)	多路输入信号的乘法运算
8	Relational Operator(比较运算)	<、>、= 等运算
9	Sum(信号综合)	综合多路信号
10	Trigonometric Function(三角函数)	三角函数的计算
11	Complex to Magnitude-Angle(取复数模和复角)	输出分别是复数的模和复角
12	Complex to Real-Imag (取复数的实部、虚部)	输出分别是复数的实部和虚部
13	Magnitude-Angle to Complex(模和复角以复数表示)	将输入模和复角写成复数形式输出
14	Real-Imag to Complex(实部、虚部以复数表示)	将输入的实部和虚部写成复数形式输出
15	Matrix Gain(矩阵增益)	输入矩阵乘以放大倍数
16	Algebraic Constraint(代数环限制)	通过代数环的限制，改良代数环路的计算
17	Combinatorial Logic(逻辑真值表)	建立一张逻辑真值表，输出按输入查表
18	Slider Gain(滑动增益)	在一定范围内可以调节增益大小
19	Sign(取输入信号的符号)	取输入信号的符号，输出为正或负

2.2.5　非线性模块库

非线性（Nonlinear）模块库的模块用于模拟各种非线性环节，其图标和功能分别见表 2-14 和表 2-15。

表 2-14　非线性模块库图标和名称

Dead Zone	Manual Switch	Quantizer	Rate Limiter	Relay
死区	两位开关	阶梯信号	斜坡函数	滞环控制
Saturation	Switch	Backlash	Multiport Switch	Coulomb & Viscous Friction
饱和限制	可控开关	间隙	多位开关	库伦和粘滞摩擦

表 2-15　非线性模块的主要功能

序号	模　块　名	主 要 功 能
1	Dead Zone(死区)	设定死区范围
2	Manual Switch(两位开关)	手动开关，双击该开关模块，输出即改变输入的位置
3	Quantizer(阶梯信号)	根据输入产生阶梯输出信号
4	Rate Limiter(斜坡函数)	限制输入信号的上升和下降的变化率
5	Relay(滞环控制)	模拟带滞环特性的继电器环节
6	Saturation(饱和限制)	设置输出的正负限幅值，模拟环节的饱和特性
7	Switch(可控开关)	根据门槛电压，选择开关的输出
8	Backlash(间隙)	模拟间隙非线性环节(如齿轮)
9	Multiport Switch(多位开关)	根据第一输入状态，选择开关的输出
10	Coulomb & Viscous Friction(库伦和粘滞摩擦)	模拟含有粘滞和静摩擦特性的非线性环节

2.2.6　信号与系统模块库

信号与系统（Signals & System）模块库的模块图标和简要功能见表 2-16 和表 2-17。该模块库有强大的功能，使用该模块库模块，可以进行复杂系统的仿真。

表 2-16　信号与系统库模块

Assignment	Bus Creator	Bus Selector	Data Store Memory	Data Store Read	Matrix Concatenation
输入信号重组	总线输入	总线输出	数据存储器	读数据	将输入变为矩阵输出

（续）

Data Store Write	Data Type Conversion	Mux	Demux	From	Merge
写入数据	数据类型转换	信号合成	信号分解	接收信号	汇合输入信号
Function-Call Generator	Goto	Goto Tag Visibility	Hit	IC	Model Info
重复操作	接收指定信号并发送	连接 Goto 和 Form 模块	信号穿越值设定	初始值设定	模型的提示信息
Probe	Reshape	Selector	Width	Signal Specification	
取输入信号特征	改变输入信号维度	选择器	取输入信号的宽度	信号属性	

表 2-17　信号与系统库模块功能

序号	模　块　名	主 要 功 能
1	Assignment(输入信号重组)	输入信号次序重新组合后输出
2	Bus Creator(总线输入)	将多路信号输入总线输出
3	Bus Selector(总线输出)	总线信号分解为多路输出
4	Data Store Memory(数据存储器)	定义数据存储器
5	Data Store Read(读数据)	从数据存储器读出数据
6	Date Store Write(写入数据)	将数据写入存储器
7	Matrix Concatenation(将输入变为矩阵输出)	将输入信号转换为矩阵形式输出
8	Data Type Conversion(数据类型转换)	将输入信号转换为十进制、二进制、八进制等输出，并有自动方式
9	Mux(信号合成)	将输入的多路信号(标量、矢量、矩阵)汇入总线输出
10	Demux(信号分解)	将总线信号分解后输出
11	From(接收信号)	从 Goto 模块接收信号并输出
12	Merge(汇合输入信号)	合并多路输入信号为单一输出
13	Function-Call Generator(重复操作)	在指定的(采样)时间内，规定重复操作的次数
14	Goto(接收指定信号并发送)	接收信号并发送到标签相同的 From 模块
15	Goto Tag Visibility(连接 Goto 和 Form 模块)	定义 Goto 模块的标签
16	Hit(信号穿越值设定)	检测信号穿越设定值的点，穿越时输出置“1”
17	IC(初始值设定)	为信号设置初始值
18	Model Info(模型的提示信息)	在仿真模型上用该模块写上模型和提示信息
19	Probe(取输入信号特征)	取输入信号的宽度、维度、采样时间等信息
20	Reshape(改变输入信号维度)	可以修改一个矢量或矩阵输入信号的维度
21	Selector(选择器)	建立输入和输出信号之间的匹配连接关系
22	Width(取输入信号的宽度)	取输入信号的宽度
23	Signal Specification(信号属性)	指定信号线的维度、采样时间、时间类型、信号类型等属性

2.2.7　仪器仪表模块库

仪器仪表（Sinks）模块库有 9 种显示和记录仪器仪表，用于观察信号波形或记录信号。仪器仪表模块库的模块和功能见表 2-18 和表 2-19。

表 2-18　仪器仪表库模块

Scope	Floating Scope	Out1	Terminator	Display
示波器	浮动示波器	分支系统输出	信号终端	数字显示
simout To Workspace	XY Graph	STOP Stop Simulation	untitled.mat To File	
信号写入工作间	函数记录仪	终止仿真	时间和信号记入 . mat 文件	

表 2-19　仪器仪表库模块功能

序号	模　块　名	主 要 功 能
1	Scope(示波器)	观察输入信号波形
2	Floating Scope(浮动示波器)	可以选择显示的信号(基本同 Scope)
3	Out1(分支系统输出)	分支系统输出端子
4	Terminator(信号终端)	用以封闭信号
5	Display(数字显示)	将信号以数字方式显示
6	To Workspace(信号写入工作间)	将信号写入工作间,以便用 MATLAB 命令处理
7	XY Graph(函数记录仪)	将输入作为 X/Y 轴变量绘图
8	Stop Simulation(终止仿真)	满足条件即终止仿真
9	To File(时间和信号记入 . mat 文件)	将输入的信号和时间记入后缀为 . mat 的文件

2.2.8　信号源模块库

信号源（Sources）模块库提供了多达 14 种的信号发生器，用于产生系统的激励信号，并且可以从工作间或 . mat 文件读入信号数据。信号源模块库的模块和功能分别见表 2-20 和表 2-21。

表 2-20　信号源模块库

Pulse Generator	Ramp	Signal Generator	Band-Limited White Noise	Random Number
脉冲发生器	斜坡输出	信号发生器	白噪声	标准的随机信号

（续）

Sine Wave	Step	Repeating Sequence	Chirp Signal	Uniform Random Number	
正弦波信号	阶跃信号	锯齿波发生器	调频信号	均匀分布的随机信号	
Clock	12:34 Digital Clock	simin From Workspace	untitled.mat From File	Ground	1 In1
时钟	数字时钟	从工作间输出数据	从.mat 文件输出数据	接地端	分支系统输入端

表 2-21　信号源模块功能

序号	模　块　名	主 要 功 能
1	Pulse Generator(脉冲发生器)	产生规则的脉冲信号
2	Ramp(斜坡输出)	产生按一定斜率上升或下降的斜坡信号
3	Signal Generator(信号发生器)	产生正弦波、方波、锯齿波和随机信号
4	Band-Limited White Noise(白噪声)	产生带宽限制的白噪声
5	Random Number(标准的随机信号)	产生一个标准的、高斯分布的随机信号
6	Sine Wave(正弦波信号)	产生幅值、频率、相位可设置的正弦信号
7	Step(阶跃信号)	产生幅值、起始时间可调的阶跃信号
8	Repeating Sequence(锯齿波发生器)	产生一个时基和高度可调的锯齿波序列
9	Chirp Signal(调频信号)	产生频率变化的正弦波信号
10	Uniform Random Number(均匀分布的随机信号)	产生均匀分布的随机信号
11	Clock(时钟)	产生时间信号
12	Digital Clock(数字时钟)	按一定时间间隔，显示时间
13	From Workspace(从工作间输出数据)	从工作间读出数据
14	From File(从.mat 文件输出数据)	从.mat 文件读出数据
15	Ground(接地端)	输入接地端
16	In1(分支系统输入端)	分支系统的输入端子

2.2.9　子系统模块库

子系统（Subsystem）模块库包括了许多按条件判断执行的模块（略）。

2.3　电力系统模型库

电力系统（SimPower System）模型库是专用于 RLC 电路、电力电子电路、电机传动控制系统和电力系统仿真用的模型库。模型库中包含了各种交直流电源，大量电气元器件和电工测量仪表等。利用这些模型可以模拟电阻、电感、电容组成的电路，含电力电子器件的开关、整流和逆变、变频等装置，以及电力系统运行和故障的各种状态，在电力电子系统和电力拖动控制系统的仿真中将主要使用该模型库的模型。电力系统模型库的模块使用与 SIMULINK 模块的使用不同，电力系统模块上有两种端口，一种端口以“□”表示，这类端口用

于连接电路，端口不分输入和输出，端口中流动的是电流，因此必须有电流的通路；另一类端口使用 SIMULINK 模块的端口，以“ > ”表示，且三角指示信号流动的方向，这类端口主要用于接入控制信号，使由电力系统模型库中的模块组成的电路可以和 SIMULINK 模型库中的控制单元连接，组成控制系统，以研究和观察在不同控制方案下系统的稳态和动态响应，为系统的设计提供依据。电力系统模型库中包含了 7 个子模型库（见图 2-26），其中 Extra Library（其他电气子模型库）包含了 7 个二级子模型库（见图 2-27），并且子模型库中还有三级模块库。各模型库中的模块和其简要功能如下：

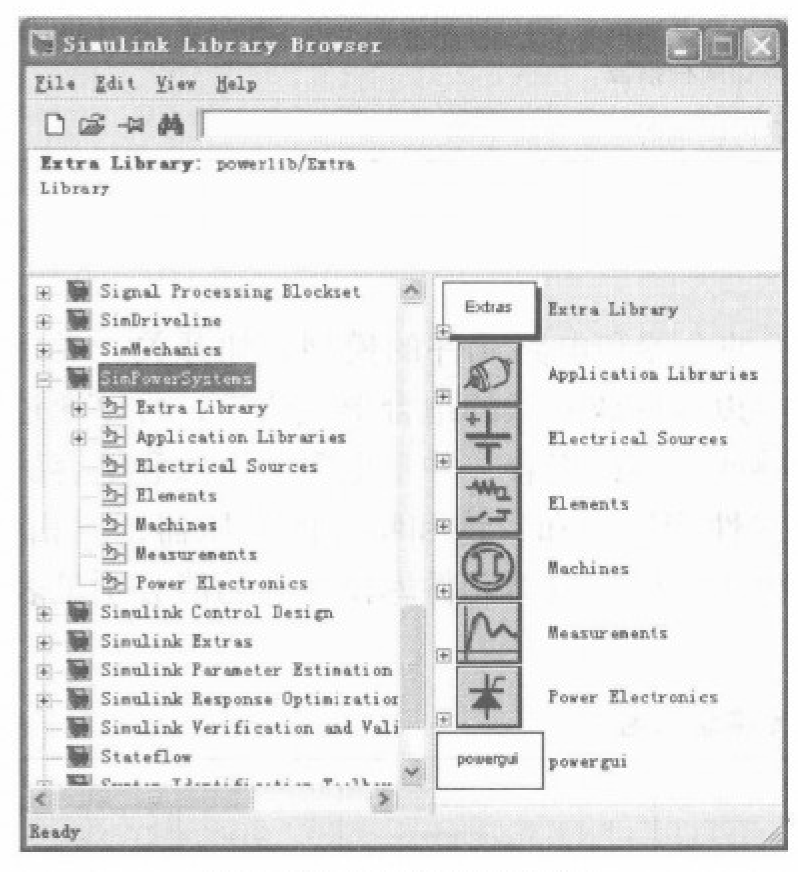


图 2-26　电力系统模型库

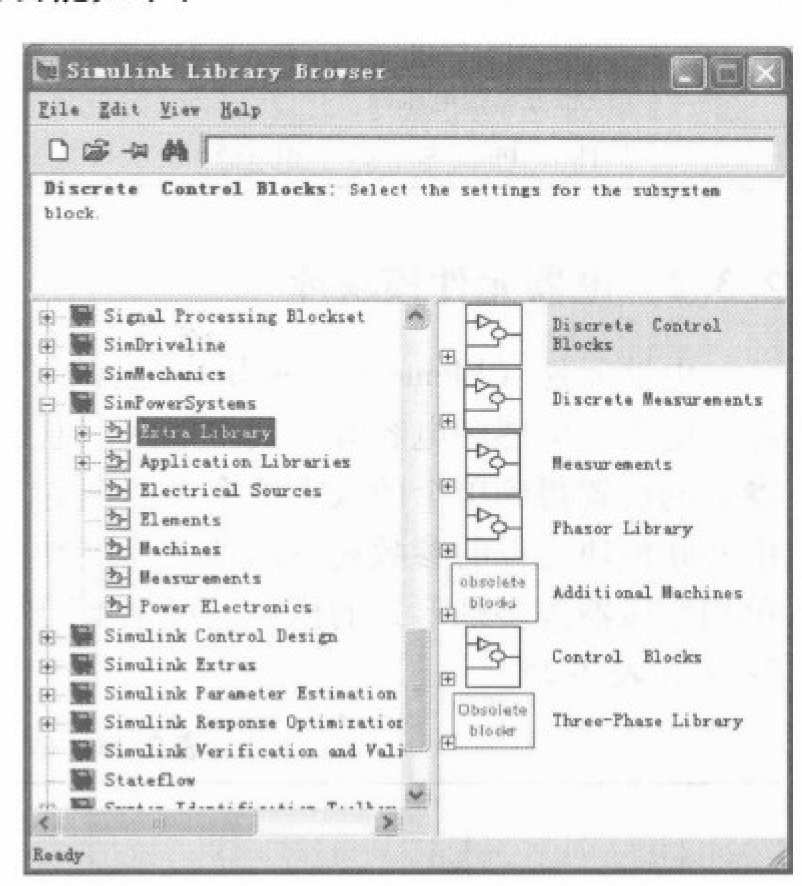


图 2-27　其他电气模型子库集

2.3.1　电源模块库

电源（Electrical Sources）模块库包含了电路和电力系统中使用的交流、直流电源，并且还有两个受控源，受控源输出的电源或电流可以受输入信号的控制。模块库中的模块和其简要功能见表 2-22 和表 2-23。

表 2-22　电源模块库的电源模块

AC Current Source	AC Voltage Source	Controlled Current Source	Controlled Voltage Source
交流电流源	交流电压源	受控电流源	受控电压源
DC Voltage Source	Three-Phase Programmable Voltage Source	Three-Phase Source	
直流电压源	三相可编程电压源	三相电源	

表 2-23 电源模块库的模块功能

序号	模 块 名	主 要 功 能
1	AC Current Source(交流电流源)	提供一个交流电流源
2	AC Voltage Source(交流电压源)	提供一个交流电压源
3	DC Voltage Source(直流电压源)	提供一个直流电源
4	Controlled Current Source(受控电流源)	输出电流受输入信号控制
5	Controlled Voltage Source(受控电压源)	输出电压受输入信号控制
6	Three-Phase Programmable Voltage Source (三相可编程电压源)	提供电压和基波频率、相位可编程调节的三相电源，并且基波上可以叠加两种谐波
7	Three-Phase Source(三相电源)	提供含内阻抗的三相交流电源

2.3.2 电器元件模块库

电器元件（Elements）模块库包含了各种常用的电器和电路元件的模型，如开关、变压器、电阻、电感和电容等。其中电阻、电感和电容以串联或并联的组合形式给出，可以通过参数的设置得到单个的或者两个、三个电阻、电感或电容的组合，并且电阻、电感和电容的串并联模块元件的参数还有两种。变压器有普通线性变压器和带饱和特性的变压器，三相、单相变压器等多种形式的模块，可供不同的仿真要求选用。电器元件库模块和功能分别见表 2-24 和表 2-25。

表 2-24 电器元件库模块和名称

Breaker	Distributed Parameters Line	PI Section Line	Linear Transformer	Multi-Winding Transformer
断路器	分布参数传输线	π 型参数传输线	单相线性变压器	二次侧多绕组单相变压器
Saturable Transformer	Parallel RLC Branch	Parallel RLC Load	Series RLC Branch	Series RLC Load
饱和变压器	RLC 并联电路	RLC 并联负载	RLC 串联电路	RLC 串联负载
Surge Arrester	Three-phase Transformer (Three Windings)	Three-phase Transformer (Two Windings)	Mutual Inductance	Three-Phase Breaker
压敏电阻	三相三绕组变压器	三相二绕组变压器	互感线圈	三相断路器

（续）

Three-Phase Dynamic Load	Three-Phase Fault	Three-Phase Harmonic Filter	Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0	Three-Phase Parallel RLC Branch
三相动态负载	三相短路故障	三相滤波器	三相互感线圈	三相 RLC 并联电路
Three-Phase Series RLC Load	Three-Phase Series RLC Btanch	Three-Phase Series RLC Load	Connection Port	Ground Neutral node 10
三相 RLC 并联负载	三相 RLC 串联电路	三相 RLC 串联负载	分支模块的电路接口	电路的接地端和公共连接点

表 2-25 电器元件库模块功能

序号	模 块 名	主 要 功 能
1	Breaker(断路器)	模拟断路器等
2	Distributed Parameters Line(分布参数传输线)	有分布电容、电感的传输导线
3	PI Section Line(π 形参数传输线)	分布电容、电感为 π 形的传输导线
4	Parallel RLC Load (RLC 并联负载)	电阻、电感、电容并联，参数单位为瓦(W)、乏(Var)
5	Series RLC Load (RLC 串联负载)	电阻、电感、电容串联，参数单位为瓦(W)、乏(Var)
6	Parallel RLC Branch (RLC 并联电路)	电阻、电感、电容并联，单位为欧姆(Ω)、亨利(H)、法拉(F)
7	Series RLC Branch (RLC 串联电路)	电阻、电感、电容串联，单位为欧姆(Ω)、亨利(H)、法拉(F)
8	Linear Transformer(单相线性变压器)	单相变压器，二次侧一个或两个绕组
9	Saturable Transformer (饱和变压器)	考虑饱和效应的单相变压器
10	Mutual Inductance (互感线圈)	有互感关系的线圈
11	Three-phase Transformer(Three Windings) (三相三绕组变压器)	三相变压器(二次侧有二组绕组)
12	Three-phase Transformer(Two Windings) (三相二绕组变压器)	三相变压器(二次侧一组绕组)
13	Surge Arrester (压敏电阻)	金属氧化物压敏电阻，过电压保护
14	Three-Phase Dynamic Load(三相动态负载)	三相负载的有功和无功值可以编程
15	Three-Phase Fault(三相短路故障)	设定三相相间或对地故障，故障发生时间可以内设定或外设定
16	Three-Phase Harmonic Filter(三相滤波器)	三相滤波器，可以设定无功、调谐频率和品质因数
17	Three-Phase Mutual Inductance Z1-Z0(三相互感线圈)	互相耦合的三相线圈，可以分别设定正序和零序分量时的阻抗
18	Three-Phase Parallel RLC Branch(三相 RLC 并联电路)	电阻、电感、电容并联的三相电路，单位为欧姆(Ω)、亨利(H)、法拉(F)

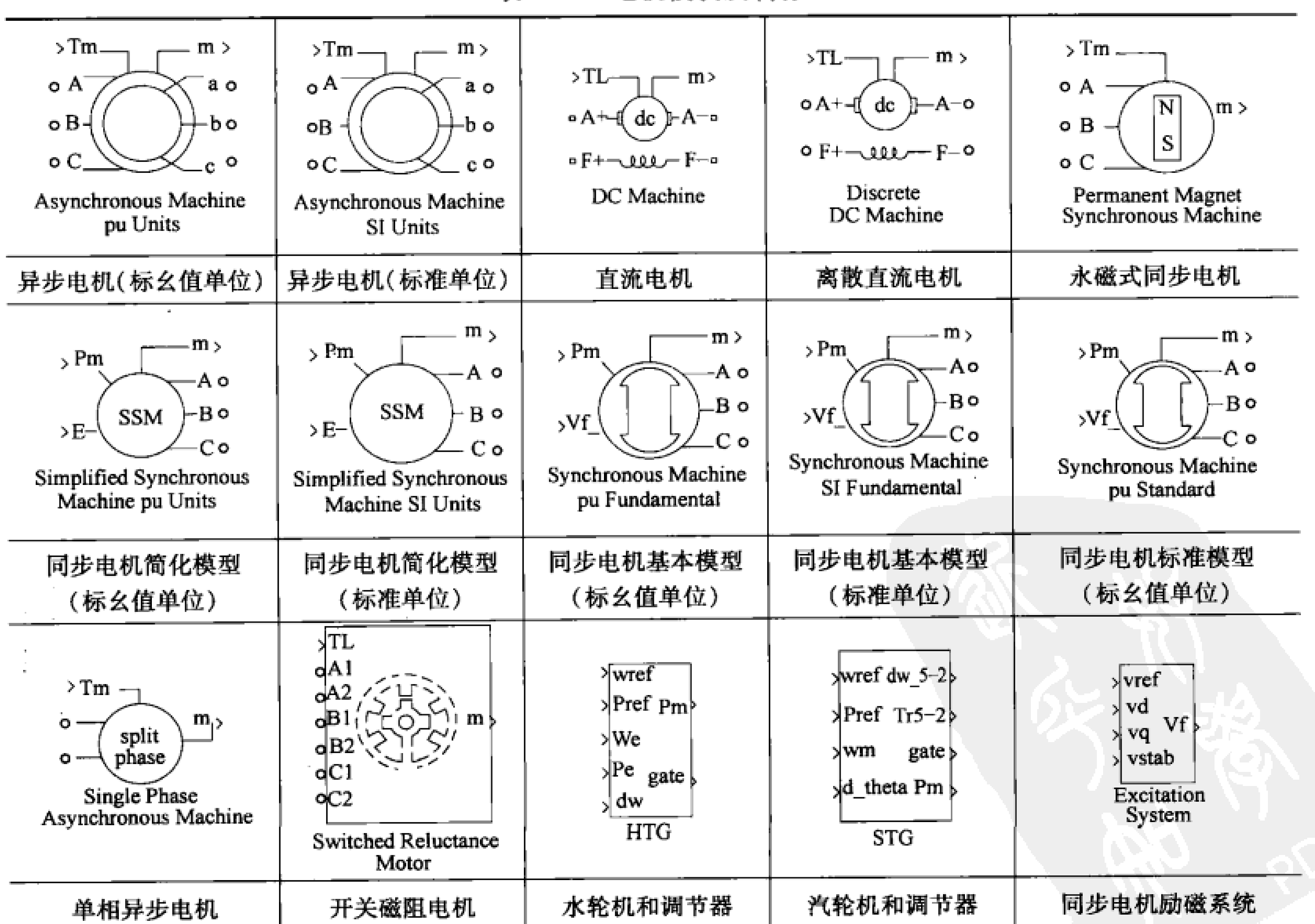
（续）

序号	模 块 名	主 要 功 能
19	Three-Phase Parallel RLC Load（三相 RLC 并联负载）	电阻、电感、电容并联的三相负载，参数单位为瓦（W）、乏（Var）
20	Three-Phase Series RLC Branch（三相 RLC 串联电路）	电阻、电感、电容串联的三相电路，单位为欧姆（Ω）、亨利（H）、法拉（F）
21	Three-Phase Series RLC Load（三相 RLC 串联负载）	电阻、电感、电容串联的三相负载，参数单位为瓦（W）、乏（Var）
22	Connection Port（分支模块的电路接口）	分支模块的电路接口
23	Ground（接地端）	电路的接地端
24	Neutral node 10（公共连接点）	电路的公共连接点，接点有编号

2.3.3 电机模块库

电机（Machines）模块库提供了 11 种直流电机、交流异步电机和同步电机的模型，电机的参数单位有标幺值单位和标准单位制两种。并且如果电机的负载转矩大于电磁转矩，则电机工作于发电状态；如果电机的负载转矩小于电磁转矩，则电机工作于电动状态，所以电机模块既可以用作电动机也可以用作发电机。电机模型库中还有励磁模块，汽轮机和水轮机的模型，以便组成同步机系统使用。电机模型库中有一个测量单元，测量单元是通用的，用来观测同步机和异步机的运行参数。模块库提供的电机模块及其功能分别见表 2-26 和表 2-27。

表 2-26 电机模块及名称



Asynchronous Machine pu Units	Asynchronous Machine SI Units	DC Machine	Discrete DC Machine	Permanent Magnet Synchronous Machine
异步电机（标幺值单位）	异步电机（标准单位）	直流电机	离散直流电机	永磁式同步电机
Simplified Synchronous Machine pu Units	Simplified Synchronous Machine SI Units	Synchronous Machine pu Fundamental	Synchronous Machine SI Fundamental	Synchronous Machine pu Standard
同步电机简化模型（标幺值单位）	同步电机简化模型（标准单位）	同步电机基本模型（标幺值单位）	同步电机基本模型（标准单位）	同步电机标准模型（标幺值单位）
Single Phase Asynchronous Machine	Switched Reluctance Motor	HTG	STG	Excitation System
单相异步电机	开关磁阻电机	水轮机和调节器	汽轮机和调节器	同步电机励磁系统

（续）

m　wm Machines Measurement Demux	In　Vstab Generic Power System Stabilizer	dw Vstab Multi-Band Power System Stabilizer		
电机测量单元	通用电力系统稳定器	有多种带宽滤波器的电力系统稳定器		

表 2-27　电机模块的主要功能

序号	模　块　名	主 要 功 能
1	Asynchronous Machine pu Units[异步电机(标幺值单位)]	交流异步电机模型,可以有绕线转子和笼型两种转子形式,参数有标幺值和标准化两种单位
2	Asynchronous Machine SI Units[异步电机(标准单位)]	
3	DC Machine(直流电机)	直流电机模型,可以用作电动机或发电机
4	Discrete DC Machine(离散直流电机)	离散的直流电机模型
5	Permanent Magnet Synchronous Machine(永磁式同步电机)	交流同步电机,转子为永磁体,有电流为梯形波和正弦波两种选择
6	Simplified Synchronous Machine pu Units[同步电机简化模型(标幺值单位)]	交流同步电机的 5 种模型,模型的复杂程度不同,对模型参数要求不同,并且有标幺值和标准制两种单位
7	Simplified Synchronous Machine SI Units[同步电机简化模型(标准单位)]	
8	Synchronous Machine pu Fundamental[同步电机基本模型(标幺值单位)]	
9	Synchronous Machine SI Fundamental[同步电机基本模型(标准单位)]	
10	Synchronous Machine pu Standard[同步电机标准型(标幺值单位)]	
11	Single Phase Asynchronous Machine(单相异步电机)	单相异步电机模型
12	Switched Reluctance Motor(开关磁阻电机)	开关磁阻电机,有定子 6 极/转子 4 极、定子 8 极/转子 6 极、定子 10 极/转子 8 极三种选择
13	Machines Measurement Demux(电机测量单元)	同步机和异步机通用的测量模块,将电机测量端以矢量形式输出的多个运行参数分解为独立的参数
14	Excitation System(同步电机励磁系统)	为交流同步机提供励磁控制的模块
15	HTG(水轮机和调节器)	和同步发电机配套的水轮机模型
16	STG(汽轮机和调节器)	和同步发电机配套的汽轮机和调节器模型
17	Generic Power System Stabilizer(通用电力系统稳定器)	提供一个由低通和高通滤波器组成的通用电力系统稳定器模型
18	Multi-Band Power System Stabilizer(有多种带宽滤波器的电力系统稳定器)	含多种带宽滤波器的电力系统稳定器,可以有低通和高通两种频带设置,并有简单和详细的两种模型选择

2.3.4 电力电子元件模块库

电力电子元件（Power Electronics）模块库包含了常用的晶闸管、可关断晶闸管、电力场效应晶体管、绝缘栅双极型晶体管等模型，还有一个多功能桥模块。电力电子元件库的模块图标与名称及其主要功能见表 2-28 和表 2-29。

表 2-28 电力电子元件模块图标与名称

Detailed Thyristor	Diode	Gto	Ideal Switch	Thyristor
详细的晶闸管模型	二极管	可关断晶闸管	理想开关	晶闸管
IGBT	IGBT/Diode	Mosfet	Three-Level Bridge	Universal Bridge
绝缘栅双极型晶体管	IGBT/二极管	电力场效应晶体管	三电平逆变器	多功能桥式电路

表 2-29 电力电子元件模块功能

序号	模 块 名	主 要 功 能
1	Detailed Thyristor（详细的晶闸管模型）	对参数要求不同的两种晶闸管模型
2	Thyristor（晶闸管）	
3	Gto（可关断晶闸管）	门极可关断的晶闸管
4	Ideal Switch（理想开关）	一种通断可控制的开关
5	IGBT（绝缘栅双极型晶体管）	绝缘栅双极型晶体管，简称 IGBT
6	IGBT/Diode（IGBT/二极管）	带续流二极管的 IGBT 模型
7	Mosfet（电力场效应晶体管）	电力场效应晶体管的通用模型，不分 P 沟道和 N 沟道
8	Diode（二极管）	普通二极管模型
9	Three-Level Bridge（三电平逆变器）	三电平逆变器模型
10	Universal Bridge（多功能桥式电路）	多功能桥可以设置为单相和三相，可以选择不同的电力电子器件，并且可以用作整流器或逆变器

2.3.5 测量仪器模块库

测量仪器（Measurements）模块库的模块用于电压、电流和阻抗的测量，其模块图标和功能见表 2-30 和表 2-31。

表 2-30 测量仪器库模块

Current Measurement	Voltage Measurement	Multimeter	Impedance Measurement	Three-Phase V-I Measurement
电流测量	电压测量	多路测量仪	阻抗测量	三相电压电流测量

表 2-31　测量仪器库模块功能

序号	模　块　名	功　　能
1	Current Measurement(电流测量)	用于检测电流,使用时串联在被测电路中,相当于电流表的检测棒,其输出端"i"则输出电流信号
2	Voltage Measurement(电压测量)	用于检测电压,使用时并联在被测电路中,相当于电压表的检测棒,其输出端"v"则输出电压信号
3	Multimeter(多路测量仪)	如果 Power System 模块的参数对话框中带有测量的选项,如电源模块的测量选项有电压、电流或电压电流三种选择,如果选择了选项,则多路测量仪可以接收到该模块的电压、电流或电压电流信号并输出
4	Impedance Measurement(阻抗测量)	用于测量一个电路某两点之间的阻抗
5	Three-Phase V-I Measurement(三相电压电流测量)	串联到三相电路中,用于测量三相电压和电流

2.3.6　其他电气模块库

其他电气模块库（Extra Library）收入了没有包括在上述的 5 个模型库中的其他电气元器件模型、测量和控制器模块，使用这些模型可以使电力系统仿真的功能更丰富。其他电气模块库又包含了 7 个子库集，这 7 个子库名称和内容见表 2-32。下面主要介绍其中测量和控制两个子库集。

表 2-32　其他电气模型库子库名称和内容

子库名称	子库内容
Additional Machines	提供了两个直流电机模块,其中一个是离散化的
Measurements	提供了 11 种测量模块
Discrete Measurements	提供了 18 种离散化的测量和控制模块
Control Blocks	14 个测量和控制模块,包括晶闸管整流器和 PWM 驱动模块
Discrete Control Blocks	提供了 29 个离散化的控制模块,包括晶闸管整流器和 PWM 的离散化驱动模块
Three-Phase Library	提供了 18 个三相负载,还有变压器、三相整流器等元器件模块
Phasor Library	提供了 5 种有功和无功测量及补偿模块

1. 控制模块子集

控制模块（Control Blocks）子集中包含了三种驱动模块和多种信号模块，模块的图标、名称以及功能见表 2-33 和表 2-34。

表 2-33　控制模块子集模块图标与名称

alpha_deg A B C Block PY PD Synchronized 12-Pulse Generator	abc 3-phase Programmable Source	Signal(s) Pulses PWM Generator	alpha_deg AB BC CA Block pulses Synchronized 6-Pulse Generator	Timer
同步 12 脉冲发生器	三相可编程电源	PWM 驱动信号发生器	同步 6 脉冲发生器	定时逻辑信号发生器

（续）

Freq V(pu) wt Sin_Cos 1-phase PLL	Freq Vabc (pu) wt Sin_Cos 3-phase PLL	1st-Order Filter	Fo=200Hz 2nd-Order Filter	[S] Q R !Q Bistable
锁相环	三相锁相环	一阶滤波器	二阶滤波器	双稳态触发器
Edge Detector	T 0.015s Monostable	t 0.01s On/Off Delay	In S/H S Sample & Hold	
上升沿检测	脉冲前后沿检测	开关延迟	采样和保持器	

表 2-34　控制模块子集模块名和功能

序号	模　块　名	主 要 功 能
1	Synchronized 12-Pulse Generator（同步 12 脉冲发生器）	用于产生 12 相晶闸管整流电路（双三相桥）的触发脉冲
2	3-phase Programmable Source（三相可编程电源）	三相可编程电源可以使输出的电压和电流的幅值、相位、频率在设定的时间发生变化，并且可以在基波的基础上叠加谐波
3	PWM Generator（PWM 驱动信号发生器）	产生三相 PWM 驱动信号，其调制信号有内部产生和外部输入两种，使用内部产生，则为 SPWM 调制方式
4	Synchronized 6-pulse Generator（同步 6 脉冲发生器）	用于产生三相晶闸管桥式整流电路（全控型）的触发脉冲
5	Timer（定时逻辑信号发生器）	在设定的时间上，使输出发生阶跃变化（0 或 1），常用于理想开关和断路器的控制
6	1-phase PLL（锁相环）	用于产生与输入可变频率信号同步的频率、相位、正弦和余弦信号
7	3-phase PLL（三相锁相环）	用于产生与输入三相可变频率信号同步的频率、相位、正弦和余弦信号
8	1st-Order Filter（一阶滤波器）	一阶滤波器
9	2nd-Order Filter（二阶滤波器）	二阶滤波器
10	Bistable（双稳态触发器）	双稳态触发器
11	Edge Detector（上升沿检测）	检测脉冲的上升沿
12	Monostable（脉冲前后沿检测）	检测脉冲的前后沿
13	On/Off Delay（开关延迟）	产生延迟的开关信号
14	Sample & Hold（采样和保持器）	在输入 2 是“1”时采样输入端 1 的信号，并保持输出

2. 测量模块子集

测量（Measurements）模块子集是对测量仪器库模块的扩充，该库图标名称以及功能见表 2-35 和表 2-36。

表 2-35 测量模块子集模块图标与名称

3-Phase Sequence Analyzer	abc_to_dq0 Transformation	dq0_to_abc Transformation	Active & Reactive Power
三相相序分析	三相静止坐标系/两相旋转坐标系变换	两相旋转坐标系/三相静止坐标系变换	有功功率和无功功率测量
Fourier	RMS	Three-Phase V-I Measurement	Total Harmonic Distorsion
傅里叶分析	有效值测量	三相电压电流测量	畸变因素分析
3-phase Instantaneous Active & Reactive Power	Mean Value	Mean Value (linear)	
三相瞬态有功和无功检测	平均值测量	线性平均值测量	

表 2-36 测量模块子集模块功能

序号	模 块 名	主 要 功 能
1	3-Phase Sequence Analyzer(三相相序分析)	分析三相输入电压的正序、负序或零序分量的幅值和相位,输入可以是平衡的三相电压或不平衡的三相电压,甚至可以是带有谐波的
2	abc_to_dq0 Transformation(三相静止坐标系/两相旋转坐标系变换)	三相静止坐标系/两相旋转坐标系变换
3	dq0_to_abc Transformation(三相静止坐标系/两相旋转坐标系变换)	两相旋转坐标系/三相静止坐标系变换
4	Active & Reactive Power(有功功率和无功功率测量)	根据输入的电压和电流(瞬时值)计算其中有功和无功分量
5	Fourier(傅里叶分析)	对输入信号作傅里叶分析,可分析指定次谐波的幅值和相位
6	RMS(有效值测量)	测量电压或电流的有效值
7	Mean Value(平均值测量)	测量电压或电流的平均值
8	Mean Value(linear)(线性平均值测量)	测量一个周期中的平均值
9	Three-Phase V-I Measurement(三相电压电流测量)	将模块串联在三相电路中,可以测量电路的三相电压和电流,并有两种单位制选择
10	Total Harmonic Distorsion(畸变因素分析)	分析输入电压或电流信号的畸变因素
11	3-phase Instantaneous Active & Reactive Power(三相瞬态有功和无功检测)	检测三相的瞬态有功和无功功率

3. 三相模型子集

三相模型子集（Three-phase Library）的模块主要使用在三相电路中，其中包括了三相电阻、电感、电容，三相断路器和各种三相变压器的模块，该子集的模块和功能见表 2-37 和表 2-38。

表 2-37　三相模型子集的模块

3−Phase Parallel RLC	3−Phase RLC Series Load	3−Phase Series RLC	3−Phase RLC Parallel Load	3−Phase Breaker	3−Phase Fault
三相 RLC 并联电路	三相 RLC 串联负载	三相 RLC 串联电路	三相 RLC 并联负载	三相断路器	三相短路故障
6−pulse diode bridge	6−pulse thyristor bridge	Inductive source with neutral	PI Line Section	DYg linear transformer	Three−phase linear transformer 12−terminals
三相桥式二极管整流器	三相桥式晶闸管整流器	带中性点的三相电源	π 形参数传输线	△/Yg 联结线性变压器	12 端三相变压器
YgD linear transformer	YgY linear transformer	YgYD linear transformer	YgYgD linear transformer	YgYgD saturable transformer	Z1−Z0
Y_g/△联结线性变压器	Y_g/Y联结线性变压器	Y_g/Y-△联结线性变压器	Y_g/Y_g-△联结线性变压器	Y_g/Y_g-△饱和变压器	三相互感线圈

表 2-38　三相模型子集模块的功能

序号	模块名	主要功能
1	3-Phase Parallel RLC(三相 RLC 并联电路)	三相对称的 RLC 并联电路
2	3-Phase Series RLC(三相 RLC 串联电路)	三相对称的 RLC 串联电路
3	3-Phase RLC Series Load(三相 RLC 串联负载)	中性点接地的三相对称 RLC 串联负载
4	3-Phase RLC Parallel Load(三相 RLC 并联负载)	中性点接地的三相对称 RLC 并联负载
5	3-Phase Breaker(三相断路器)	三相断路器
6	3-Phase Fault(三相短路故障)	可以模拟三相短路故障
7	6-pulse diode bridge(三相桥式二极管整流器)	即三相桥式不控整流器
8	6-pulse thyristor bridge(三相桥式晶闸管整流器)	三相桥式晶闸管元件整流器
9	Inductive source with neutral(带中性点的三相电源)	有中性点的三相电源，并且可以设定电源的内阻抗

（续）

序号	模 块 名	主 要 功 能
10	PI Line Section（π 形参数传输线）	三相有 π 形参数结构的传输线
11	DYg linear transformer（△/丫$_g$ 联结线性变压器）	二次侧中性点接地的△/丫联结线性三相变压器
12	YgD linear transformer（丫$_g$/△联结线性变压器）	一次侧中性点接地的三相丫/△联结性变压器
13	YgY linear transformer（丫$_g$/丫联结线性变压器）	一次侧中性点接地的三相丫/丫联结线性变压器
14	YgYD linear transformer（丫$_g$/丫-△联结线性变压器）	一次侧中性点接地的三相丫/丫-△联结线性变压器
15	YgYgD linear transformer（丫$_g$/丫-△联法线性变压器）	一、二次侧中性点接地的三相丫/丫-△联结线性变压器
16	YgYgD saturable transformer（丫$_g$/丫$_g$-△饱和变压器）	一、二次侧中性点接地的三相丫/丫-△联结饱和特性变压器
17	Three-phase linear transformer 12-terminals（12 端三相变压器）	绕组分离的三相线性变压器（有 12 端子），可以任意连接
18	Z1-Z0（三相互感线圈）	三个有互感的线圈

2.3.7 应用举例模型库

应用举例模型库（Application Libraries）是 MATLAB7.0 以后增加的一个模型库，库中包含了多个电力系统仿真的举例，这对学习和应用仿真有很大帮助。应用举例模型库有三个子模型库，分别为新能源模型库（Distributed Library）、电力拖动模型库（Electric Drives Library）、柔性供电模型库（Flexible AC Transmission System（FACTS）Library）。

1. 新能源模型库

新能源模型库（Distributed Library）中有 3 个风力发电系统模型，其图标和功能见表 2-39。

表 2-39 新能源模型库

图 标	模 型 名	功 能
Generator speed (pu) Pitch angle (deg) Tm (pu) Wind speed (m/s) Wind Turbine	Wind Turbine（风力发动机）	提供了一个叶片可调的风力发动机模型，发动机输出转矩随风速和叶片角变化
Wind (m/s) Trip A m B C Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator (Phasor Type)	Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator（Phasor Type）（风力发动机驱动双馈发电机）	提供了一个风力发动机驱动的双馈发电机模型，双馈发电机转子回路采用 AC/DC/AC 变频电路
wind (m/s) trip A m B C Wind Turbine Induction Generator (Phasor Type)	Wind Turbine Induction Generator（Phasor Type）（风力发动机驱动的笼型异步发电机）	提供了一个风力发动机驱动的发电机模型，发电机采用交流笼型电机

2. 电力拖动模型库

电力拖动模型库（Electric Drives Library）中包含了交流调速 AC Dirve，直流调速 DC Dirve，和机械轴减速器 Shafts and speed reducers 三个模型库，模型库的内容分别见表 2-40、表 2-41 和表 2-42。本书在第 8 章中对直流调速和交流调速模型库的部分模型作了比较详细的介绍。

表 2-40　交流调速模型库

图　标	模　型　名	功　能
DTC Induction Motor Drive	DTC Induction Motor Drive（直接转矩控制系统）	提供了异步电动机直接转矩控制系统仿真模型
Field-Oriented Control Induction Motor Drive	Field-Oriented Control Induction Motor Drive（磁场定向控制交流调速系统）	一个按转子磁场定向控制的交流调速模型
PM Synchronous Motor Drive	PM Synchronous Motor Drive（永磁同步电动机调速系统）	一个采用矢量控制的永磁同步电动机调速系统模型
Self-Controlled Synchronous Motor Drive	Self-Controlled Synchronous Motor Drive（自适应控制同步电动机调速系统）	采用自适应控制的同步电动机调速系统模型
Six-Step VSI Induction Motor Drive	Six-Step VSI Induction Motor Drive（六节拍感应电动机调速系统）	一个采用六节拍矩形波电压源型逆变器的交流调速系统模型
Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive	Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive（空间矢量控制交流调速系统）	采用空间矢量控制的异步电动机调速系统模型

表 2-41　直流调速系统模型库

图　标	模　型　名	功　　能
SP, Mec_T, A+, A−, Motor, Conv., Ctrl, DC1 Two-Quadrant Single-Phase Rectifier DC Drive	Two-Quadrant Single-Phase Rectifier DC Drive（两象限单相晶闸管整流器直流调速系统）	采用单相桥式晶闸管整流器，有转速调节器、电流调节器闭环控制的直流电动机调速系统
SP, Mec_T, A+, A−, Motor, Conv., Ctrl, DC2 Four-Quadrant Single-Phase Rectifier DC Drive	Four-Quadrant Single-PhaseRectifier DC Drive（四象限单相晶闸管整流器直流调速系统）	直流电动机由两组反并联的单相桥式晶闸管整流器供电，$\alpha=\beta$ 控制有环流直流可逆调速系统
SP, Mec_T, A+, B, C, Motor, Conv., Ctrl, DC3 Two-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive	Two-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive（两象限三相晶闸管整流器直流调速系统）	采用三相桥式晶闸管整流器，有转速调节器、电流调节器闭环控制的直流电动机调速系统
SP, Mec_T, A, B, C, Motor, Conv., Ctrl, DC4 Four-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive	Four-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive（四象限三相晶闸管整流器直流调速系统）	直流电动机由两组反并联的三相桥式晶闸管整流器供电，$\alpha=\beta$ 控制有环流直流可逆调速系统
SP, Mec_T, Vcc, Gnd, Motor, Conv., Ctrl, DC5 One-Quadrant Chopper DC Drive	One-Quadrant Chopper DC Drive（一象限斩波控制直流调速系统）	由一个 IGBT 组成的 DC/DC 斩波控制的直流电动机调速系统，带转速调节器和电流调节器闭环控制，有速度和转矩两种控制模式
SP, Mec_T, Vcc, Gnd, Motor, Conv., Ctrl, DC6 Two-Quadrant Chopper DC Drive	Two-Quadrant Chopper DC Drive（两象限斩波控制直流调速系统）	由两个 IGBT 组成的 DC/DC 斩波控制的直流电动机调速系统，带转速调节器和电流调节器闭环控制，有速度和转矩两种控制模式

（续）

图　　标	模　型　名	功　　能
SP Motor Mec_T Conv Vcc DC7 Gnd Ctrl Four-Quadrant Chopper DC Drive	Four-Quadrant Chopper DC Drive（四象限斩波控制直流调速系统）	直流电动机由4个IGBT组成的H型斩波电路供电，PWM调压调速，带转速和电流调节器的双闭环控制

表2-42　机械轴模型

图　　标	模　型　名	功　　能
Nm TI NI Shaft Mechanical Shaft	Mechanical Shaft（机械轴）	一个机械轴的数学模型，其Nm端是轴输入端的速度（r/min），其NI端是轴输出端的速度（r/min）。模型输出是输出端的转矩
Nh Th NI Speed reducer TI Speed Reducer	Speed Reducer（机械减速器）	机械减速器模型，模型输入端Nh是减速器高速轴的速度（r/min），输入端NI是减速器低速轴的速度（r/min），输出端Th是减速器高速轴的转矩，输出端TI是减速器低速速轴负载的转矩

3. 柔性输电模型库

柔性供电是保证电网输电质量的重要措施，柔性输电模型库（Flexible AC Transmission System（FACTS）Library）提供了静止无功补偿和动态无功补偿的4个模型（见表2-43）。

表2-43　柔性供电模型库

图　　标	模　型　名	功　　能
Trip A STATCOM m B C Static Synchronous Compensator (Phasor Type)	Static Synchronous Compensator（Phasor Type）（静止同步补偿器）	静止同步补偿器STATCOM并联在输电线路上，通过电力电子装置VSC调节注入无功，稳定线路电压，电力电子装置VSC采用自关断器件GTO、IGBT或IGCT

（续）

图　标	模 型 名	功　能
Bypass, Vqref, A1, B1, C1, SSSC, m, A2, B2, C2 Static Synchronous Series Compensator (Phasor Type)	Static Synchronous Series Compensator(Phasor Type)（串联型静止同步补偿器）	串联型静止同步补偿器串联在输电线路上，通过电力电子装置补偿输电线电压
A, B, C, SVC, m Static Var Compensator (Phasor Type)	Static Var Compensator(Phasor Type)（静止无功补偿器）	采用晶闸管控制电抗器 TCR 和晶闸管投切电容器 TSC 组成静止无功补偿器(SVC)，调节输电线路无功，实现柔性输电
Trip, Bypass, A1, B1, C1, UPFC, m, A2, B2, C2 Unified Power Flow Controller (Phasor Type)	Unified Power Flow Controller (Phasor Type)统一无功补偿器	统一无功补偿器(UPFC)结合了并联无功补偿和串联无功补偿，具有两种补偿的特点，是柔性输电的通用方案

第3章　电力电子器件模型

电力系统模型库在 MATLAB6.1 中使用的是 Version 2 版本，Version 2 版本中电气模块的输入和输出端使用有方向的信号接点“ > ”，输入端只能与输出端相连接。从 MATLAB6.5 开始，电力系统模型库使用了电路模块（the physical Modeling blocks），其特点是模块的电路接点用“□”表示，没有输入与输出的区分，在电路连接时更方便，但控制信号仍然使用信号接点“ > ”。因此，在 MATLAB6.1 环境中建立的电力电子模型要在 MATLAB6.5 以上版本上运行时，需要将 Version 2 电力系统模型库模块转换为 Version 3 版本的电路模块，转换的方法是使用 psbupdate 函数，其方法是：首先打开以 Version 2 版本建立的模型，然后在 MATLAB 命令窗口中键入：

Psbupdate（‘name of the Model to convert’）

按回车键命令执行后：

1）以 powerlib 模块取换了 Version 2 版本的 powerlib2 的模块，模块的电路连接点变为用“□”表示。

2）以电路连线取换原 SIMULINK 的信号连线，一些特殊的线，如分支模块的连线需要重新连接。

3）psbupdate 函数会将变换的模型以“原文件名 + updated”保存。

MATLAB/SIMULINK/SimPower System 模型库中包含了常用的电力电子器件模型和整流、逆变电路模块以及相应的驱动模块，使用这些模块构建和编辑电力电子电路并仿真是很方便的。MATLAB 电力电子器件模型使用的是简化的宏模型，它只要求元器件的外特性与实际元器件特性基本相符，而没有考虑元器件内部的细微结构，属于系统级模型。这与 PSPICE 软件的电子元器件模型不同，PSPICE 的元器件模型更详细、复杂，是器件级模型，用 PSPICE 仿真可以细致地反映元器件工作情况。虽然 MATLAB 的电力电子器件模型较为简单，但是它开销的系统资源较少，用于电力电子电路和系统仿真时，出现仿真不收敛的几率较少，这是它的特点。

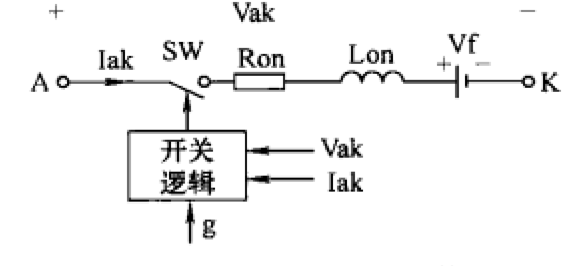


图 3-1　电力电子器件模型

开关特性是电力电子器件的主要特性，MATLAB 电力电子器件模型主要描述电力电子器件的开关特性，并且不同电力电子器件模型都具有类似的模型结构（见图 3-1）。模型主要由可控开关 SW、电阻 Ron、电感 Lon、直流电压源 Vf 的串联电路和开关逻辑单元组成，不同电力电子器件的区别在开关逻辑不同，开关逻辑决定了各种器件的开关特性。模型中的电阻 Ron 和直流电压源 Vf 分别用来反映电力电子器件的导通电阻和导通时的门槛电压。串联电感限制了器件开关过程中的电流升降速度，模拟器件导通或关断时的变化过程。MATLAB 的电力电子器件一般都没有考虑器件关断时的漏电流，这方面不如 SPICE 模型细致。

MATLAB 的电力电子器件必须连接在电路中使用，也就是要有电流的回路，但是器件的驱动仅仅是取决于门极信号的有无，没有电压型和电流型驱动的区别，也不需要形成驱动

的回路，这是 MATLAB 电力电子器件模型与其他 SPICE 模型的不同之处。尽管模型与实际器件工作有差异，但是也使 MATLAB 电力电子器件模型在与控制单元连接的时候很方便。

电力电子器件在使用时一般都并联有缓冲电路，因此 MATLAB 电力电子器件模型一般也已经并联了简单的 RC 串联缓冲电路，缓冲电路的 RC 值可以在参数表中设置，更复杂的缓冲电路则需要另外建立。有的器件模型还反并联了二极管（如 MOSFET），在使用中要注意。

MATLAB 的电力电子器件模型中含有电感，因此有电流源的性质，在没有连接缓冲电路时不能直接与电感或电流源相连接，也不能开路工作。含电力电子模型的电路或系统仿真时，仿真算法一般采用刚性积分算法，如 ode23tb、ode15s，这样可以得到较快的仿真速度。

电力电子元件的模块上，一般都带有一个测量输出端 m，通过 m 端可以观测元器件的电压和电流，不仅使测量方便，并且可以为选择元件的耐压和电流提供依据。

3.1　二极管模型

二极管是不控的单向导电型二端半导体器件，二极管模块的图标和仿真模型如图 3-2 和图 3-3 所示。模型二极管的单向导电性能由二极管逻辑控制，当二极管承受正向电压时（Vak >0），二极管导通，当二极管电流下降到零（Iak = 0）或承受反向电压时（Vak ≤ 0 ），二极管关断。二极管的伏安特性如图 3-4 所示。二极管模型的参数见表 3-1。

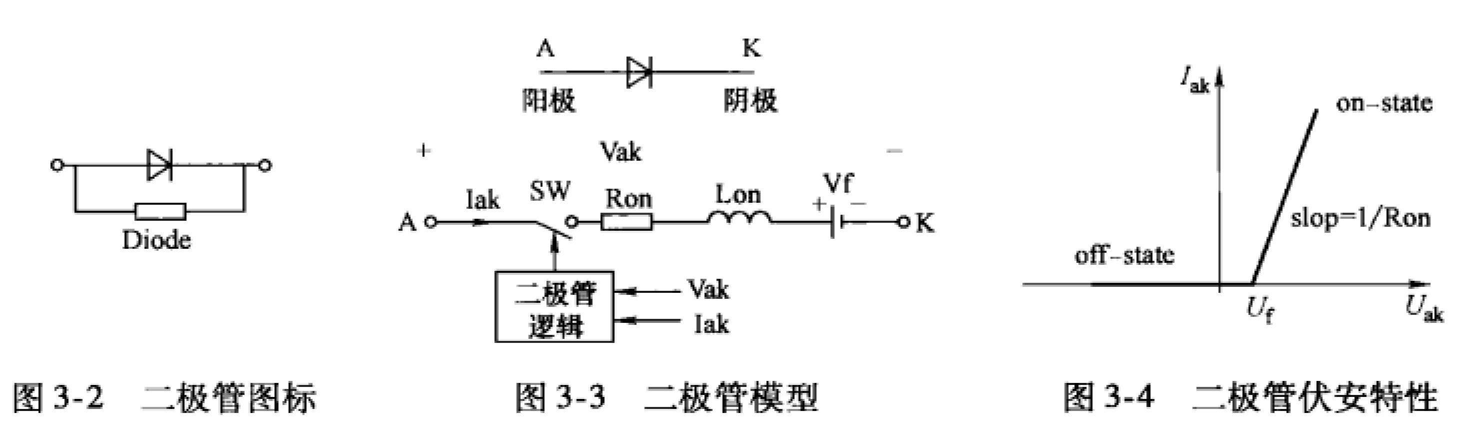


图 3-2　二极管图标　　图 3-3　二极管模型　　图 3-4　二极管伏安特性

表 3-1　二极管参数

二极管参数	单　位	二极管参数	单　位
导通电阻　Ron	Ω(欧姆)	初始电流　Ic	A(安培)
电 感　Lon	H(亨利)	缓冲电阻　Rs	Ω(欧姆)
正向电压　Vf	V(伏特)	缓冲电容　Cs	F(法拉)

在二极管参数设置中，当电感参数为“0”时电阻不能同时取“0”，当电阻参数取“0”时电感参数也不能同时取“0”。在设置了门槛电压 Vf 时，只有当二极管正向电压大于 Vf 后，二极管才能导通。在参数对话框还有初始电流一栏，设置初始电流可以使电路在非零状态下开始仿真，但是初始电流设置是有条件的，首先是在二极管电感参数大于 0 时才能设定这项参数，其次是仿真电路的其他储能元件也设定了初始值，尤其设定所有其他相关储能元件的初始值是很麻烦的，所以一般都取初始电流为“0”，使电路在零状态下开始仿真。

模型二极管已并联有 RC 缓冲电路，在缓冲电阻值设为“inf”，缓冲电容设为“0”时，则二极管取消了缓冲电路部分。如果在缓冲电阻不为“0”时，设缓冲电容为“inf”，则是

纯电阻的缓冲电路。

MATLAB 的二极管没有普通二极管、电力二极管、快恢复二极管等等的区分，统一为一个模型，不同二极管只能在参数设置上略有反映。

3.2 晶闸管模型

晶闸管是可控整流电路常用的器件，在模型库中晶闸管模型有两种（见图 3-5），一种是较详细的模型，其模型名为 Detailed Thyristor，它的可设置参数较多；另一种是简化的模型，模型名为 Thyristor，它的参数设置较简单。晶闸管的模型结构和伏安特性分别如图 3-6 和图 3-7 所示。双击模型图标则弹出模型参数的对话框，在对话框中可以设置的晶闸管参数见表 3-2。

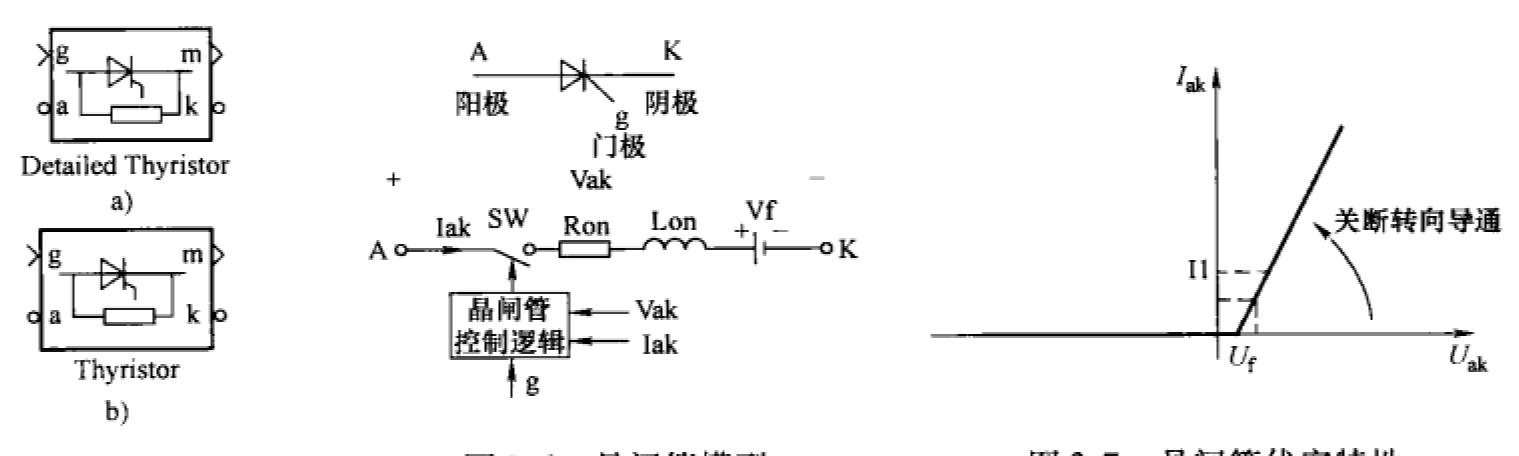


图 3-5 晶闸管图标
a）复杂模型 b）普通模型

图 3-6 晶闸管模型

图 3-7 晶闸管伏安特性

表 3-2 晶闸管模型参数

晶闸管参数名	单 位	备 注	晶闸管参数名	单 位	备 注
导通电阻 Ron	Ω(欧姆)		关断时间 Tq	s(秒)	普通模型没有
内部电感 Lon	H(亨利)		初始电流 Ic	A(安培)	
正向电压 Vf	V(伏特)		缓冲电阻 Rs	Ω(欧姆)	
擎住电流 Il	A(安培)	普通模型没有	缓冲电容 Cs	F(法拉)	

晶闸管模型在晶闸管承受正向电压（Vak >0），且门极有正的触发脉冲信号（g >0）时晶闸管导通。触发脉冲的宽度要使阳极电流 Iak 能大于设定的晶闸管擎住电流 Il，晶闸管才能正常导通，否则在导通过程中，如果在阳极电流还小于擎住电流时，门极信号已经为零（g =0），则晶闸管仍要转向关断。

导通的晶闸管在阳极电流下降到零（Iak =0），或者晶闸管承受反向电压时，晶闸管关断，但是晶闸管承受反向电压的时间应大于设置的关断时间 Tq，否则尽管门极信号为零，晶闸管还可能导通，因为关断时间是表示晶闸管内载流子复合的时间，是晶闸管阳极电流减少为零后到晶闸管能再次施加正向电压而不会误导通的一段时间间隔。

晶闸管模型的导通和关断与实际的物理晶闸管有差别，一是只要门极信号大于零，同时满足正向电压条件，晶闸管就能导通；二是阳极电流下降到零（Iak =0）后，晶闸管才能关断，而不是阳极电流下降到维持电流以下晶闸管就关断。

晶闸管的简单模型没有擎住电流和关断时间这两项参数，因此在较复杂的电路仿真中使用较为方便。关于初始电流、缓冲电阻和缓冲电容的设置要求与二极管相同。

含晶闸管模型的电路仿真，仿真算法宜采用 Ode23tb 或 Ode15s。

3.3　可关断晶闸管模型

可关断晶闸管（GTO）与普通晶闸管的区别是可以通过门极信号在任何时间使导通的晶闸管关断，其图标如图 3-8 所示。但是 MATLAB 的可关断晶闸管模型，在导通和关断的控制要求上与实际的可关断晶闸管有较大不同，可关断晶闸管模型在管子承受正向电压，且门极信号大于零（g >0）时导通，在门极信号等于零（g =0）时关断。实际的物理可关断晶闸管在一旦导通后门极信号可以为零，管子仍保持导通状态，而关断时需要在门极有足够的反抽电流才能关断。模型的关断过程分为两段，一段是下降时间 Tf，一段是电流的拖尾时间 Tt。在电流的下降时间内，电流减小到关断时电流的 10%，再经过一段拖尾时间，电流才下降为零，电流的下降时间和拖尾时间可以在参数中设置。可关断晶闸管的模型和开关特性分别如图 3-9 和图 3-10 所示，模型的参数见表 3-3。

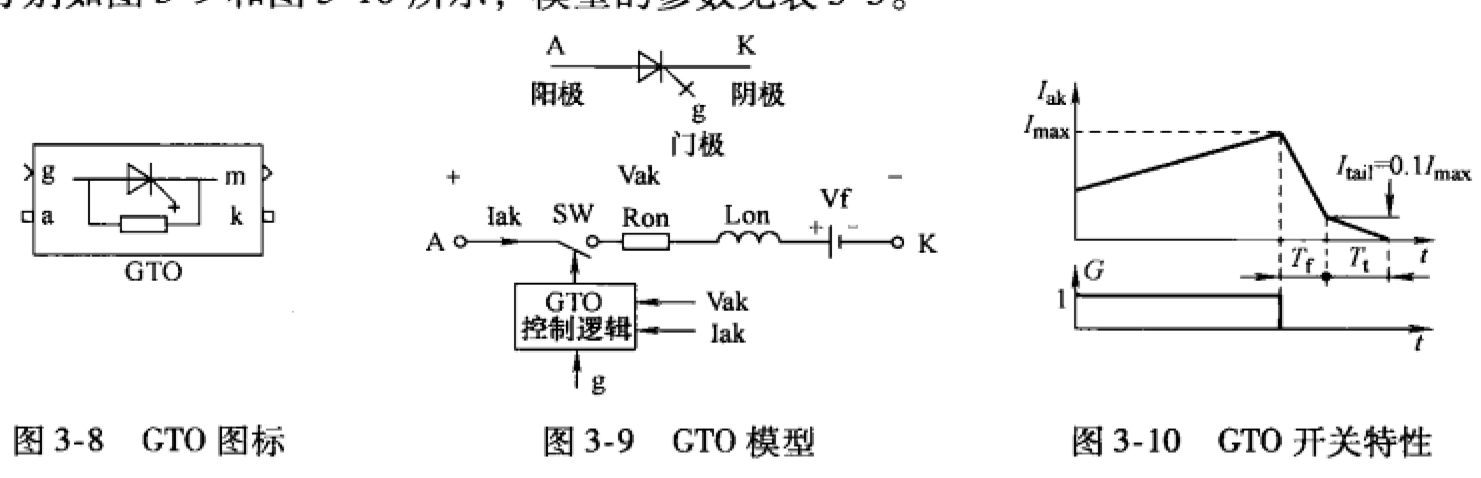


图 3-8　GTO 图标　　图 3-9　GTO 模型　　图 3-10　GTO 开关特性

表 3-3　可关断晶闸管模型参数

可关断晶闸管参数名	单　位	可关断晶闸管参数名	单　位
导通电阻　Ron	Ω(欧姆)	电流拖尾时间　Tt	s(秒)
内部电感　Lon	H(亨利)	初始电流　Ic	A(安培)
正向电压 Vf	V(伏)	缓冲电阻　Rs	Ω(欧姆)
电流 10% 下降时间 Tf	s(秒)	缓冲电容　Cs	F(法拉)

可关断晶闸管模型也已经并联了 RC 缓冲电路，缓冲电路的设置与二极管模型相同。带可关断晶闸管模型的电路仿真，仿真算法同样宜采用 Ode23tb 或 Ode15s。

3.4　电力场效应晶体管模型

电力场效应晶体管（MOSFET）具有开关频率高、导通压降小等特点，在电力电子电路中使用广泛。场效应晶体管一般有结型和绝缘栅型两种，MATLAB 的场效应晶体管模型并不区分这两种模型，也没有 P 沟道和 N 沟道之分，它仅仅反映了场效应晶体管的开关特性，是场效应晶体管通用的宏模型。电力场效应晶体管模型的图标如图 3-11 所示，结构和外特性如图 3-12 和图 3-13 所示，模型的参数见表 3-4。

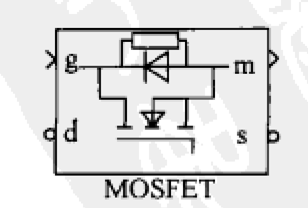


图 3-11　MOSFET 图标

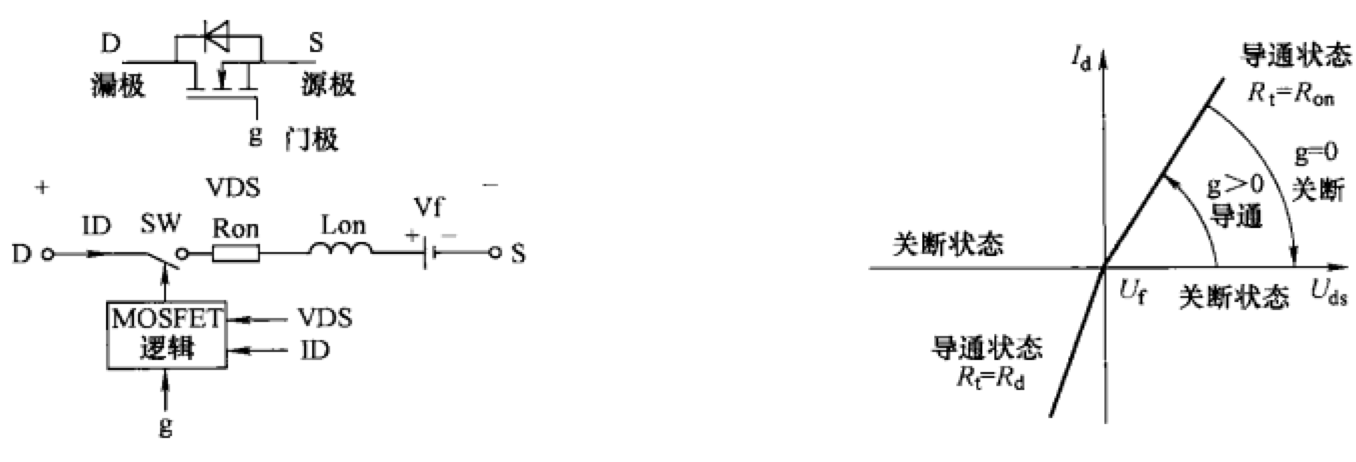


图 3-12 MOSFET 模型

图 3-13 MOSFET 外特性

表 3-4 电力场效应晶体管模型参数

MOSFET 参数	单 位	MOSFET 参数	单 位
导通电阻 Ron	Ω(欧姆)	初始电流 Ic	A(安培)
导通电感 Lon	H(亨利)	缓冲电阻 Rs	Ω(欧姆)
寄生二极管电阻 Rd	Ω(欧姆)	缓冲电容 Cs	F(法拉)
寄生二极管正向电压 Vf	V(伏)		

场效应晶体管模型在门极信号为正（g>0），且漏极电流 ID>0 时导通，在门极信号为零时关断。场效应晶体管模型上反并联了一个二极管，因此在外特性上，正向导通状态的导通电阻是 Ron，而外特性中的反向导通是二极管导通，导通电阻是二极管的电阻 Rd。

参数中的缓冲电阻和缓冲电容的参数设置与二极管相同。

3.5 绝缘栅双极型晶体管模型

绝缘栅双极型晶体管（IGBT）结合了场效应晶体管和电力晶体管的优点，具有驱动功率小、开关速度快、通流能力强的特点，目前已经成为中小功率电力电子设备的主导器件。IGBT 的模块有两个：一个是并联缓冲电阻和电容的模型（见图 3-14a），一个是反并联二极管的模型（见图 3-14b）。绝缘栅双极型晶体管模型和外特性如图 3-15 和图 3-16 所示。模型参数见表 3-5。

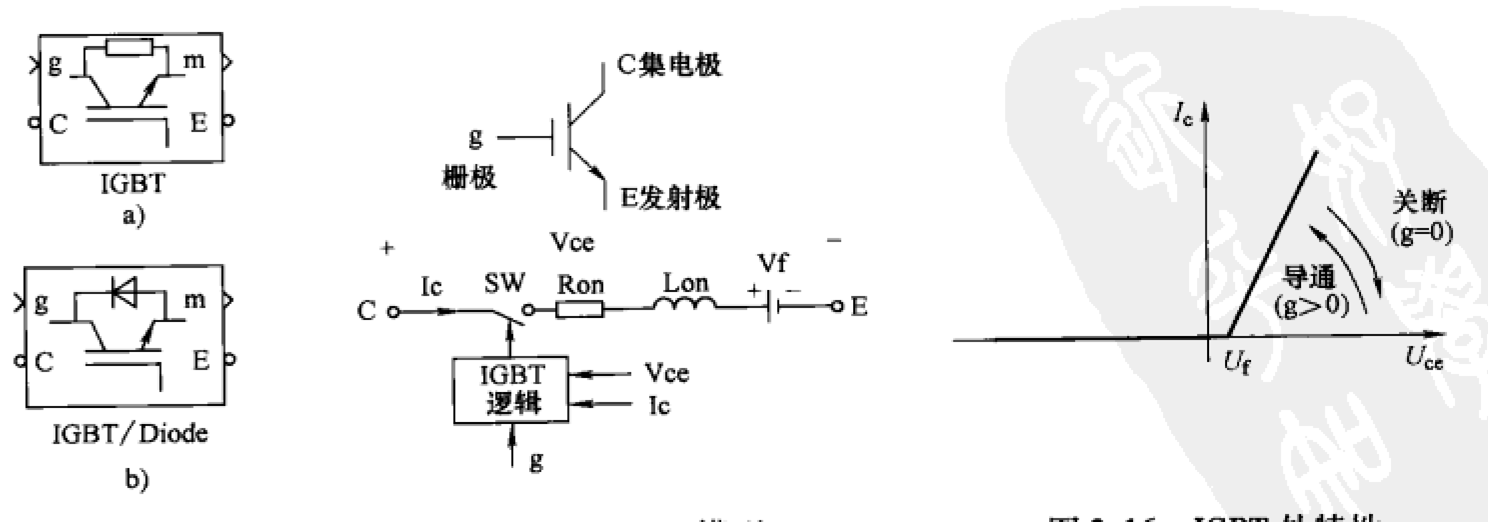


图 3-14 IGBT 图标

图 3-15 IGBT 模型

图 3-16 IGBT 外特性

IGBT 模型在集射极间电压为正（Vce >0），且有门极信号（g >0）时导通；即使集射极间电压为正（Vce >0），但是门极信号为零（g =0），IGBT 也要关断。如果 IGBT 集射极间电压为负（Vce <0），则管子处在关断状态。IGBT/Diode 模型与一般商品 IGBT 一样，内部已并联了反向二极管，所以在 IGBT 集射极间电压为负时也反向导通。

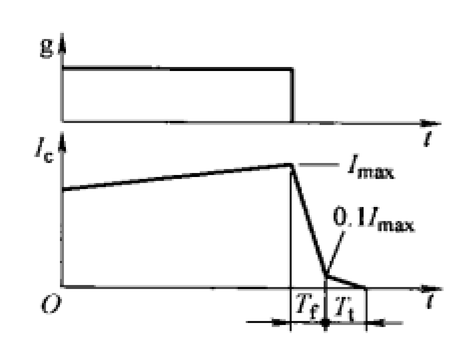


图 3-17　IGBT 模型的开关特性

IGBT 模型的开关特性如图 3-17 所示。IGBT 在关断时，有电流下降和电流拖尾两端时间，在下降时间内，电流减小到关断前的 10%，再经过一段电流的拖尾时间，IGBT 才完全关断。IGBT 的电流下降时间和拖尾时间可以在参数对话框中设置。

表 3-5　IGBT 模型参数

IGBT 参数	单　位	IGBT 参数	单　位
导通电阻　Ron	Ω(欧姆)	电流拖尾时间　Tt	S(秒)
导通电感　Lon	H(亨利)	初始电流　Ic	A(安培)
正向电压　Vf	V(伏特)	缓冲电阻　Rs	Ω(欧姆)
电流 10% 下降时间 Tf	S(秒)	缓冲电容　Cs	F(法拉)

注：带反并联二极管模型仅有导通电阻、缓冲电阻和缓冲电容三项参数。

连接了 RC 缓冲电路的 IGBT 模型，缓冲电阻和电容的设置与其他器件相同。

3.6　理想开关模型

理想开关（Ideal Switch）是 MATLAB 特设的一种电子开关。理想开关的特点是开关受门极控制，开关导通时电流可以双向通过。理想开关的图标如图 3-18 所示。理想开关的模型比较简单（见图 3-19），它仅由开关 SW 和电阻 Ron 组成，SW 由开关逻辑控制。当门极信号 g =0 时，无论开关受正向还是反向电压，开关都关断；当门极信号 g >0 时，无论开关受正向还是反向电压，开关都导通，如图 3-20 所示。在门极触发时，开关动作是瞬时完成的。理想开关模型的参数设置见表 3-6。其初始状态一栏，如果起动仿真时开关应是接通状态，则设为“0”；如果起动仿真时开关应是断开的，则设为“1”。缓冲电阻和电容的设置与前面相同。

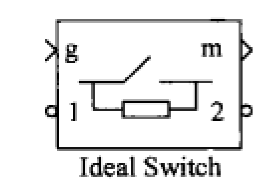


图 3-18　理想开关图标

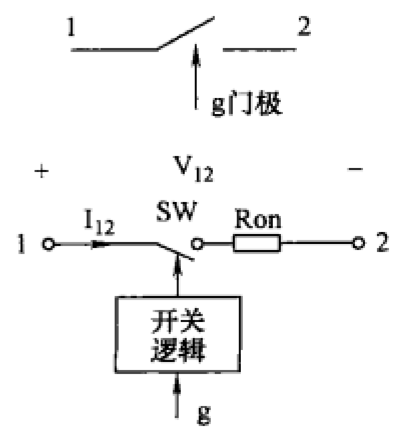


图 3-19　理想开关模型

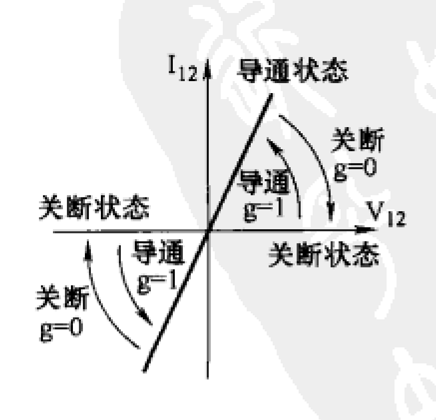


图 3-20　理想开关伏安特性

表 3-6　理想开关模型参数

理想开关参数	单　位	理想开关参数	单　位
导通电阻　Ron	Ω(欧姆)	缓冲电阻　Rs	Ω(欧姆)
初始状态	导通"0",关断"1"	缓冲电容　Cs	F(法拉)

理想开关在仿真中可以作为断路器使用，设计适当的门极驱动，也可以作为简单的半导体开关（如 GTO、MOSFET 等），用于电流斩波控制。

3.7　三相桥式整流电路模块

三相桥式整流电路是最常用的整流电路，MATLAB 模型库提供了不控的和可控的两种三相桥式整流电路模型，但有的 7.0 模型库中，整流桥模型还是没有经转换的旧模块，使用时需要用 psbupdate 命令转换为带电路接口的模块。

3.7.1　三相桥式不控整流电路模块

三相桥式不控整流电路由 6 个二极管按桥式连接组成（见图 3-21）。它有三个输入端，分别是 A、B、C，用于连接三相电源或整流变压器的三相输出；它的两个输出端 K 和 A，则输出整流后的直流电压，其中 K 端为“＋”，A 端为“－”。模型的参数见表 3-7。不控整流电路模型实际设置的是二极管参数，其中 RC 缓冲电路的设置也与二极管相同。

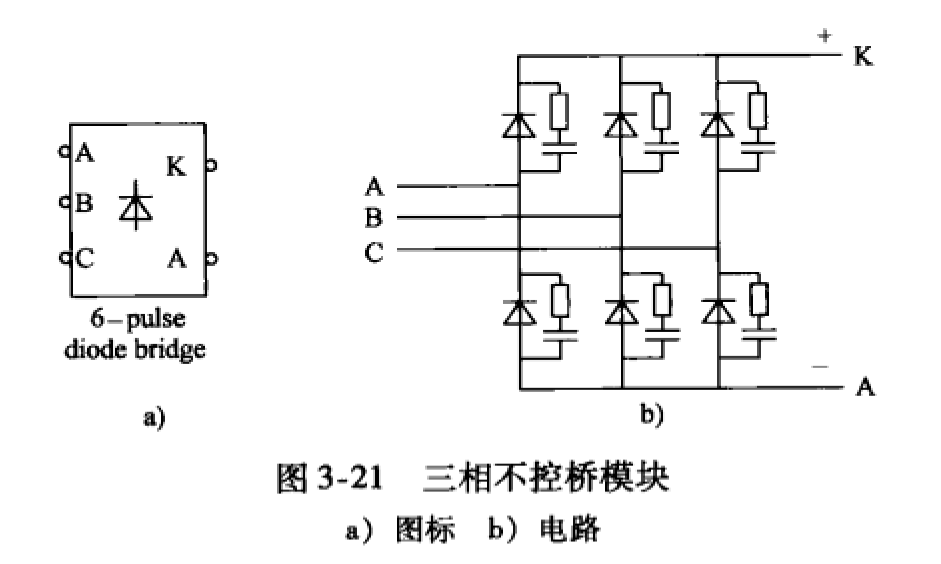


图 3-21　三相不控桥模块
a）图标　b）电路

表 3-7　三相桥式不控整流电路参数

参　数	单　位
二极管通态电阻	Ω(欧姆)
二极管通态电感	H(亨利)
正向电压	V(伏特)
缓冲电阻	Ω(欧姆)
缓冲电容	F(法拉)

3.7.2　三相桥式可控整流电路模块

三相桥式可控整流电路由 6 个晶闸管作桥式连接而成，其图标和电路如图3-22所示。使用时，模块的 A、B、C 三个输入端连接三相电源或三相变压器的二次侧；它的两个输出端 K 和 A，则输出整流后的直流电压，其中 K 端为“＋”，A 端为“－”。模块的脉冲输入端 pulse 用于接入晶闸管的触发信号，三相桥式可控整

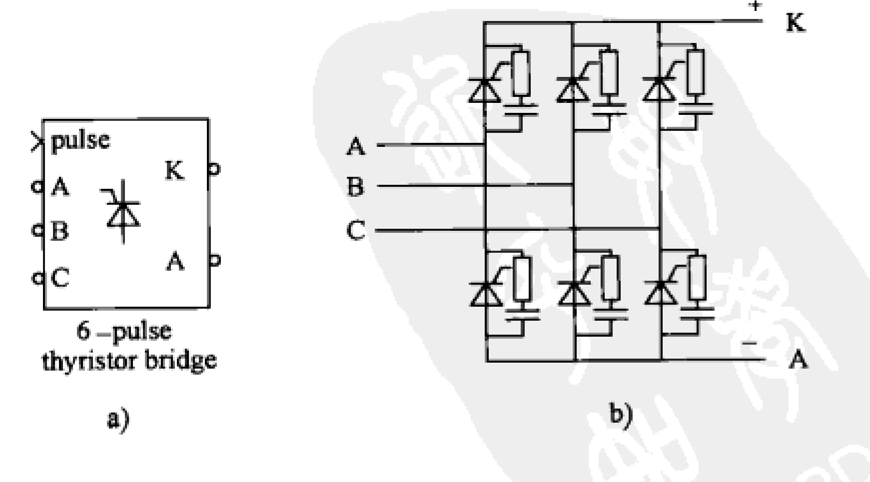


图 3-22　三相桥式可控整流电路和图标
a）图标　b）三相桥式可控整流电路

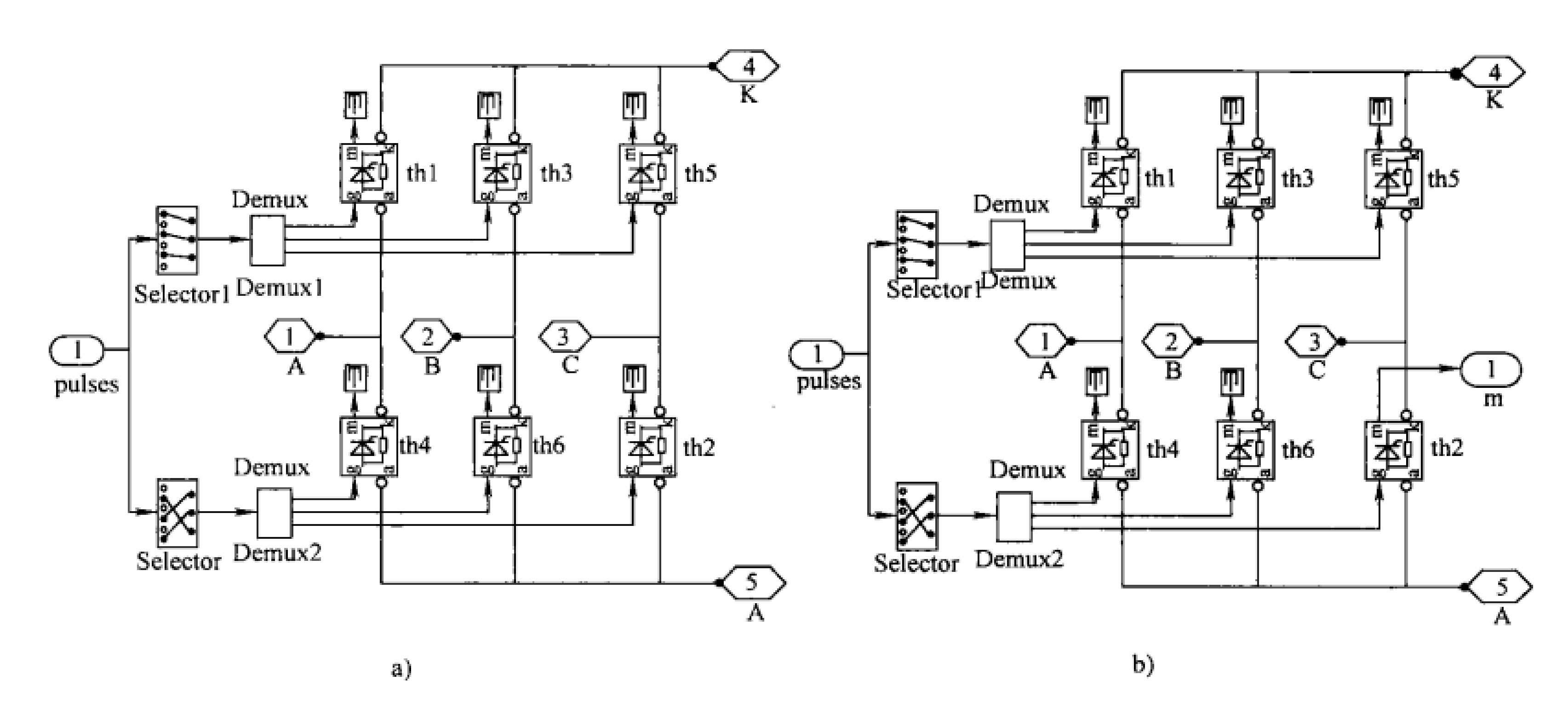


图 3-23　三相桥式整流模块分支模型

a）三相桥式整流电路模型　b）晶闸管 th5 引出测量端

流电路模块有专用的触发模块，这在驱动模块一节中介绍。

三相桥式可控整流电路模块是由 6 个单个晶闸管模块连接的分支电路（见图 3-23a），模块上没有留出测量的端口，在分支电路中已经将晶闸管的测量端封闭，这在需要观察晶闸管的电压和电流时不方便。为了便于观测晶闸管的电压和电流，可以对模型略作修改，方法如下：点击选中可控整流模块，在 Edit 菜单下选中 Look under mask，则可调出如图 3-23a 所示的整流电路模型，如果需要观测某一晶闸管的电流电压，则将该晶闸管模型测量端的“山字型”封口删除，换接上分支电路的输出端口即可（见图 3-23b）。修改后的三相桥式可控整流电路图标上即增加了测量端，通过此测量端可以观测指定的晶闸管承受的电压和电流。

在晶闸管三相可控整流模块中可设置的参数有晶闸管的通态电阻和通态电感，以及缓冲电阻和电容值（见表 3-8），缓冲电阻和缓冲电容的设置要求与前相同。

表 3-8　三相桥式可控整流模块参数

晶闸管参数	单　　位	晶闸管参数	单　　位
导通电阻	Ω(欧姆)	缓冲电阻	Ω(欧姆)
导通电感	H(亨利)	缓冲电容	F(法拉)

3.8　通用桥式电路模块

通用桥式电路模块（Universal Bridge）是一个特殊的模块，模块图标如图 3-24 所示，它既可以用于整流也可用于逆变，并且桥臂个数和开关器件都可以选择。点击通用桥模块图标，弹出模块的对话框，如图 3-25所示。在对话框中，第 1 栏是选择模块桥臂的相数，有 1、2、3 三种相数可供选择，其中“1”对应的是单相半桥式电路，“2”对应的是单相全桥式电路，“3”对应于三相全桥式电路；对话框的第 4 栏可选择变流器使用的电力电子开关种

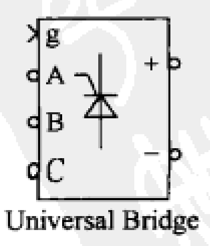


图 3-24　通用桥模块图标

类，这里有 MATLAB 模型库的 6 种开关可以选择，即二极管、晶闸管、GTO、MOSFET、IGBT 和理想开关。开关器件的参数、缓冲电阻和电容同样可在对话框中选择。其他缓冲电路和开关器件的参数设定与单个电力电子器件开关的参数设定相同，不过变流器模块中可设置的参数较少，也就是说，变流器模块使用的开关模型较简单。如果在最后一栏选择了测量项，则可以用多路测量仪 multimeter 观测开关器件的电压和电流波形。

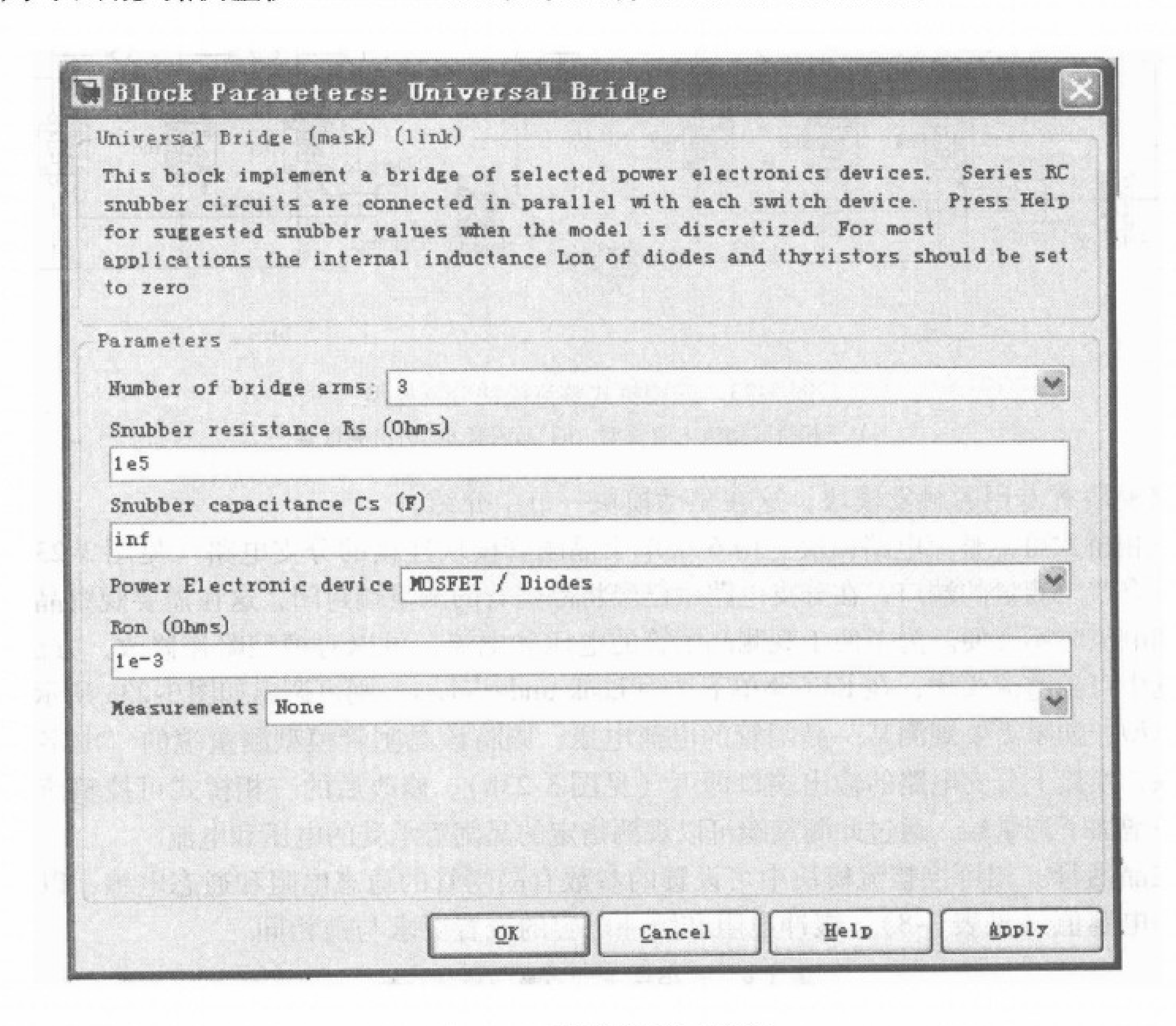


图 3-25　通用桥模块对话框

通用桥模块在选择晶闸管器件时，电路结构和器件编号如图 3-26 所示，功能也与图 3-22的三相桥式可控整流电路模块相同，在选择 GTO、MOSFET、IGBT 和理想开关时，电路结构和器件编号如图 3-27 所示。两种情况器件的编号顺序不同，而模块驱动脉冲输入端 g

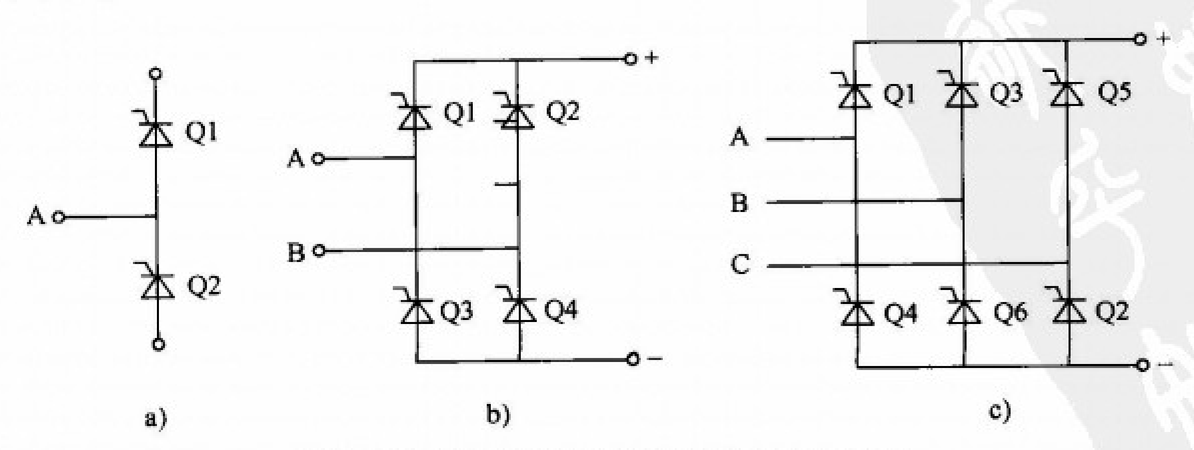


图 3-26　通用桥晶闸管类器件电路结构

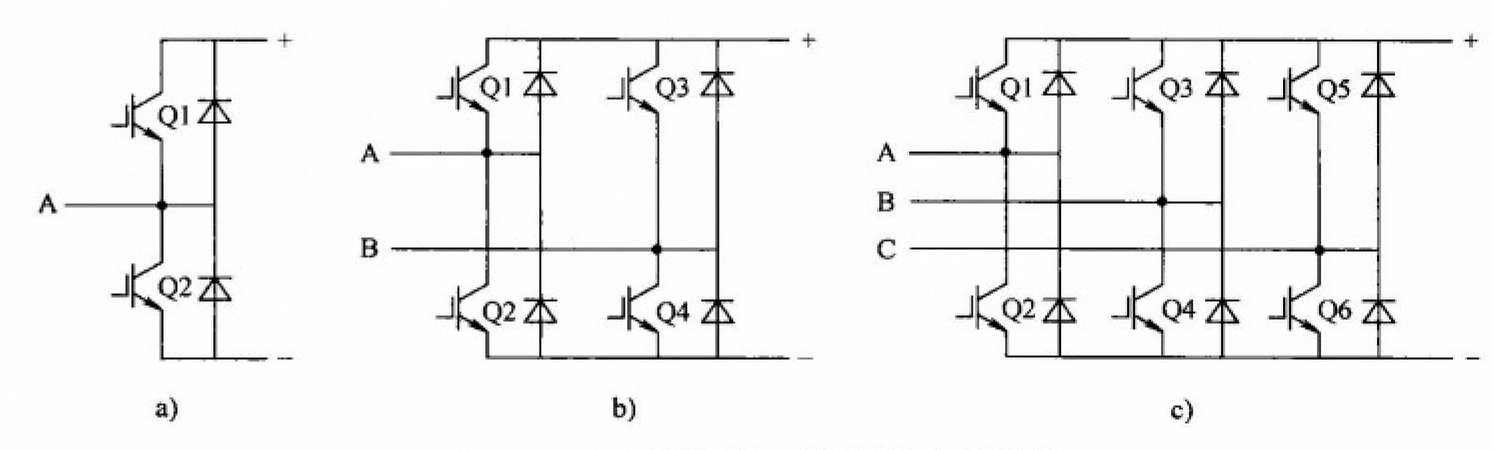


图 3-27　通用桥可关断类器件电路结构

的输入脉冲是与器件的编号顺序对应的，对一个桥臂的半桥电路，驱动脉冲顺序是 Q1、Q2；对 2 个桥臂的单相桥电路，驱动脉冲顺序是 Q1、Q2、Q3、Q4；对 3 个桥臂的三相桥电路，驱动脉冲顺序是 Q1、Q2、Q3、Q4、Q5、Q6。如果是自关断器件，模块在自关断器件上已经反并联了续流二极管。

3.9　三电平变流器模块

三电平变流器模块（Three-Level Bridge）的电路结构如图 3-28 所示，在模块对话框中（见图 3-29），开关器件有 GTO、MOSFET、IGBT 和理想开关 4 种可以选择，变流器的相数也可以在对话框中设定。如果选定的是 GTO、MOSFET、IGBT 器件，电路结构如图 3-28a 所示，变流器每相有 4 个开关组成，每相有 3 种工作状态。如果选用理想开关时，电路结构如图 3-28b 所示。在模块图标 g 端输入驱动脉冲的顺序为 Q1a、Q2a、Q3a、Q4a、Q1b、Q2b、Q3b、Q4b、Q1c、Q2c、Q3c、Q4c。但对于采用理想开关时的三电平电路如图 3-28b 所示，每相脉冲 Q1 驱动开关 SW1，脉冲 Q4 驱动开关 SW2，脉冲 Q2 和 Q3 经过“与门”驱动开关 SW3。

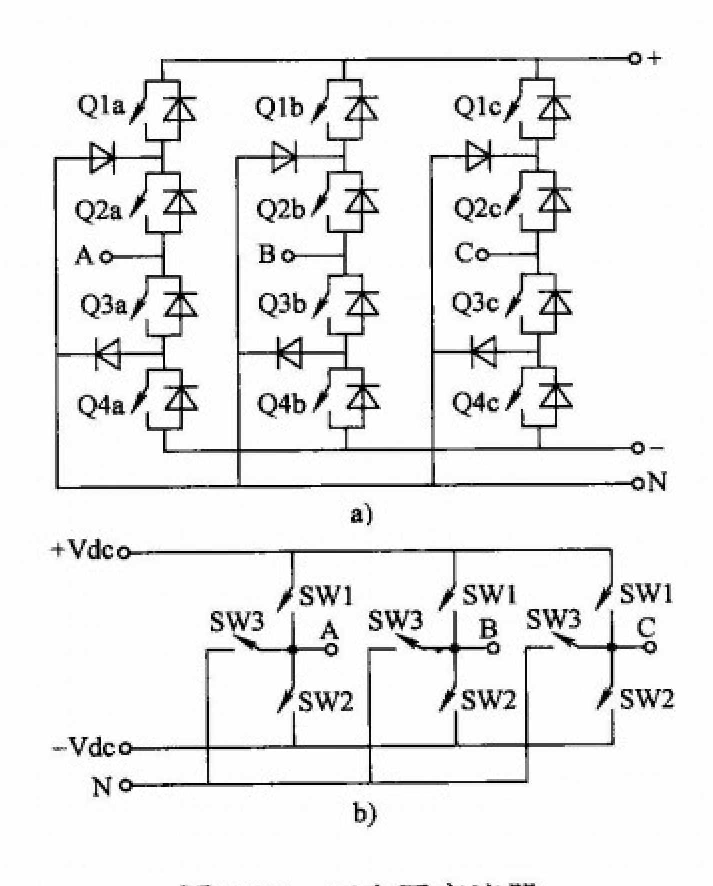


图 3-28　三电平变流器
a）可关断器件电路　b）可控开关电路

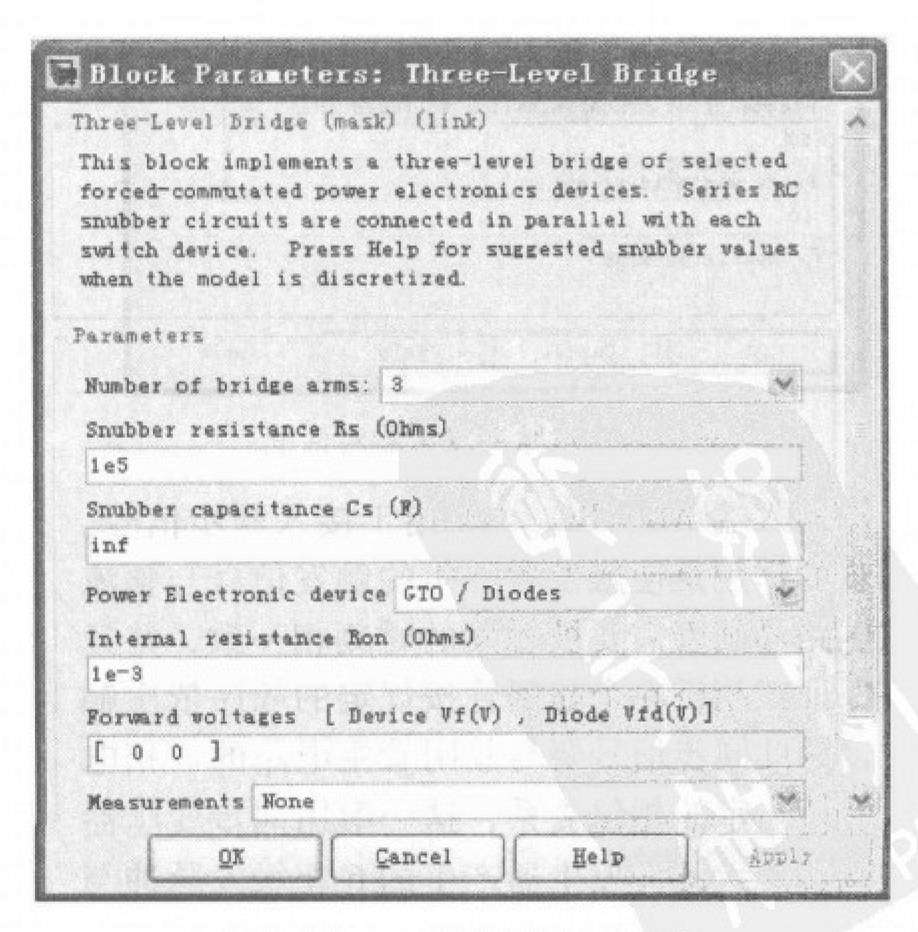


图 3-29　三电平变流器对话框

3.10 驱动模块

电力电子器件工作的时候都需要有正确的门极控制信号，产生控制信号的驱动电路是电力电子电路必有的组成部分，并且晶闸管和其他自关断电力电子器件的驱动要求不同，因此MATLAB的电力系统模型库提供了两种驱动模块：一种是针对晶闸管电路的，另一种是适用于自关断器件电路的。MATLAB电力电子器件模型的驱动要求与实际物理器件的驱动要求不同，实际物理器件的驱动要求信号有一定的强度，即要有一定的电压和电流，而器件模型的驱动仅仅是在于门极信号的有无，因此MATLAB驱动模块是原理性的宏模型。

3.10.1 同步六脉冲发生器

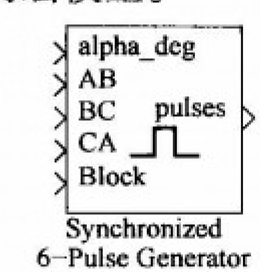


图3-30 六脉冲发生器图标

同步六脉冲发生器（Synchronized 6-Pulse Generator）用于产生三相桥式整流电路晶闸管的触发脉冲，在一周期内，它产生6个触发信号，每个触发信号的间隔是60°。

六脉冲发生器模块有5个输入端，一个输出端（见图3-30）。输入端alpha-deg用于给定移相控制角的大小，控制角的单位是“度”。控制角既可以是固定值，也可以是变化值。固定的控制角可以用常数模块来设定，变化的控制角一般由控制电路来产生（参考整流电路一节）。

图3-31 六脉冲发生器对话框

输入端AB、BC、CA用于接入同步信号。同步的作用是使触发器产生的触发信号与整流主电路晶闸管需要被触发的时刻相一致，并且要保证三相桥6个晶闸管按规定的顺序依次触发，因此同步信号要与晶闸管主电路的三相电源保持一定的相位关系，这一般用同步变压器来调整。六脉冲发生器产生的6相触发脉冲与输入同步电压的相位关系如图3-32所示。图中

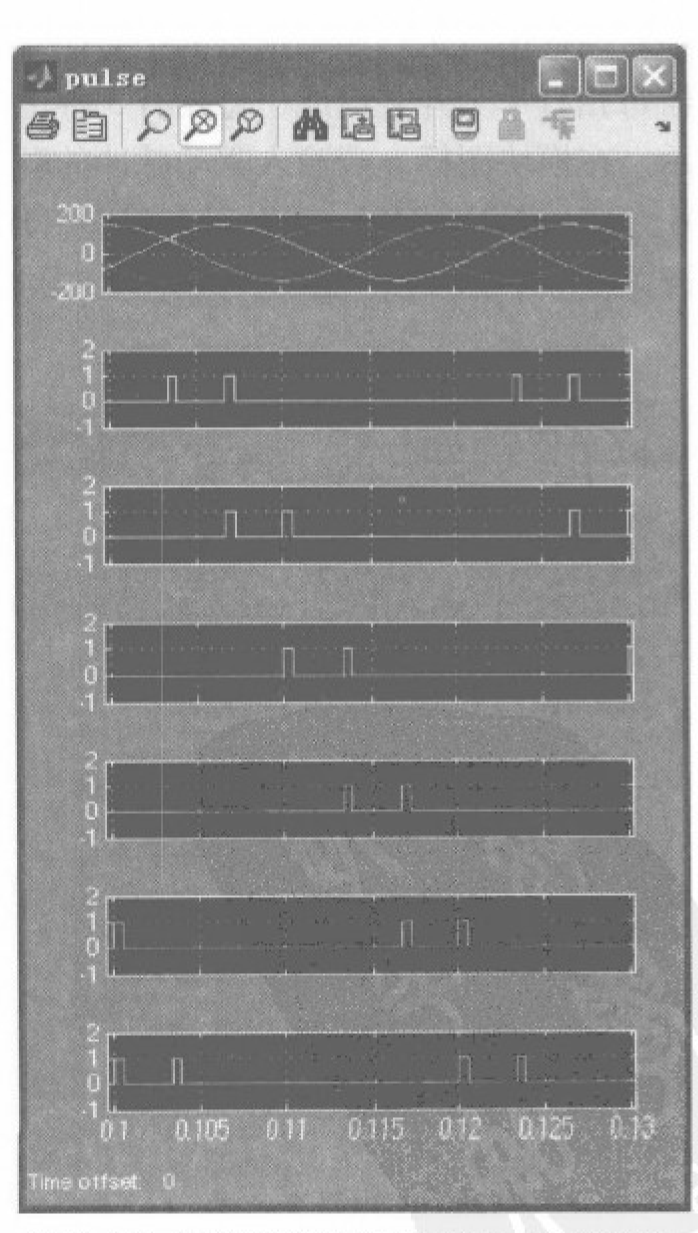


图3-32 同步电压与触发脉冲（双脉冲）

上方是三相同步信号 u_{AB}、u_{BC}、u_{CA}，以下依次分别是 VT1 ~ VT6 6 个晶闸管的触发脉冲（图示为双脉冲触发），相邻两个晶闸管的触发相隔 60°。

三相桥式整流电路有两种触发方式，即宽脉冲触发和双脉冲触发，两种触发方式可以在对话框中选择。双击三相桥模块，弹出对话框（见图 3-31），在对话框中选中“Double Pulsing”，则为双脉冲触发，否则为宽脉冲触发方式。同时在框中还可以设定脉冲的宽度和重复频率。在宽脉冲触发时，脉冲宽度要大于 60°。重复频率应与整流器电源频率相同。图 3-29 中的脉冲是采用的双脉冲触发方式，即在下一个晶闸管触发的同时给前一个晶闸管补一个脉冲，以保证在电流断续时，整流器上下桥臂都各有一个晶闸管同时导通。

模块的第 5 个输入端 Block 用于控制触发脉冲的输出，在该端置“0”，则有脉冲输出；如果置“1”，则没有脉冲输出，整流器也不会工作。该端可以用作过电流保护和直流可逆系统中整流器的工作状态选择。

六个晶闸管触发脉冲信号由模块的输出端 pulses 输出，使用时只要将该输出端与三相桥式整流电路模块（见图 3-22a）的脉冲输入端连接即可。

3.10.2　十二脉冲发生器

十二脉冲发生器用于产生十二相整流器的触发脉冲，其图标如图 3-33 所示。十二相整流器一般由两组三相桥式整流电路串联或并联组成，整流变压器可采用Y/Y-△或△/Y-△联结（见图 3-34）。

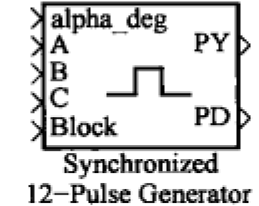


图 3-33　十二脉冲发生器

十二脉冲发生器模块有 5 个信号输入端和两个输出端，其中输入端 alpha 给定移相控制角的大小，控制角的单位是“度”。控制角与六脉冲发生器一样，既可以是固定值，也可以是变化值。输入端 A、B、C 用于接入同步电压信号，同步信号电压取与整流变压器一次侧相位相同的相电压，如图 3-31 所示。输入端 block 用于控制触发脉冲的输出，当 block 端置“1”，则停止触发脉冲的输出，block 端置“0”，则有脉冲输出，整流器可以工作。

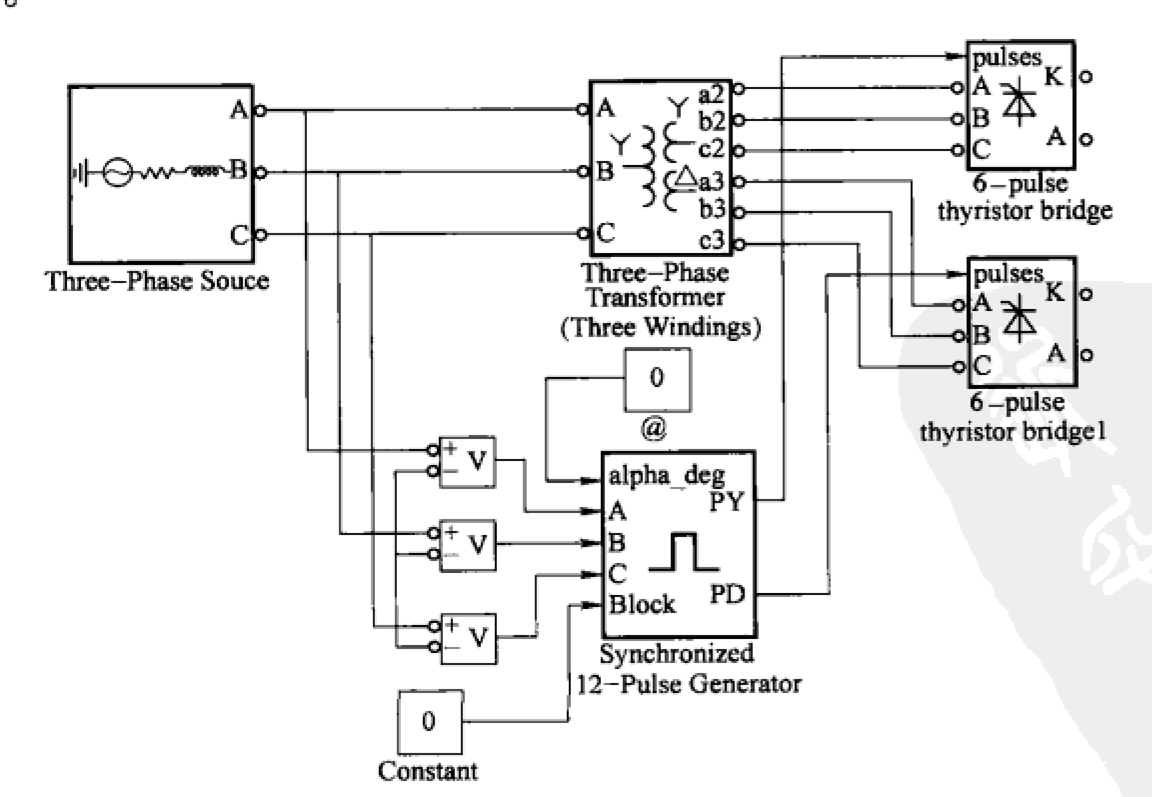


图 3-34　十二相整流器和触发器的连接

十二脉冲发生器模块的两个输出端分别输出两组脉冲信号，每组各有 6 个脉冲，其中 PY 端输出的脉冲信号用于触发与变压器二次侧Y联结绕组连接的三相桥式整流器，PD 端输出的脉冲用于触发与变压器二次侧△联结绕组连接的三相桥式整流器。三相桥式整流器的晶闸管按自然导通顺序编号。

十二脉冲发生器与六脉冲发生器一样，有宽脉冲和双脉冲两种触发方式，它的参数设置与六脉冲发生器相同。

3.10.3 PWM 脉冲发生器

PWM 脉宽调制方式在逆变器控制中使用很广泛，并且现在在整流电路中也开始应用。PWM 脉冲发生器的图标如图 3-35 所示，MATLAB 模型库提供的 PWM 脉冲发生器是一个多功能模块，它可以为 GTO、FET、IGBT 等自关断器件组成的一相、二相和三相桥式变流电路提供驱动信号，并且还可以用于双三相桥式电路（12 脉冲）的驱动，这可以在模块对话框中模式一栏（Generator Mode）选择（见图 3-36）。

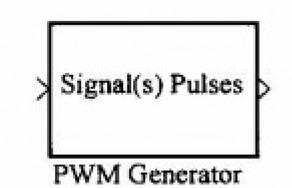


图 3-35 PWM 脉冲发生器图标

PWM 脉冲发生器脉宽调制的原理是以三角波（载波）与调制波比较，在三角波与调制波的相交点处产生脉冲的前后沿。三角波的频率可以在对话框中设置，且三角波的幅值固定为 1。调制波有两种产生方式：一种是由 PWM 脉冲发生器自动生成，另一种在脉冲发生器输入端由外部输入。点击对话框的内调制信号生成栏（Internal generation of modulating signals）前的方块，则选中了内调制信号生成模式，对话框出现了调制度、输出电压频率和输出电压相位三项参数设置栏。在采用内调制信号生成模式时，调制波固定为正弦波，即 SPWM 调制方式，设置的调制度、输出电压频率和输出电压相位三项参数实际上是内部产生的调制正弦波的参数。选中内调制信号生成方式后，模块的输入端不用连接。当选择外部输入调制信号时，调制波的频率和相位则由外部输入的信号波形决定，但是外部输入的信号波形幅值不能大于 1。

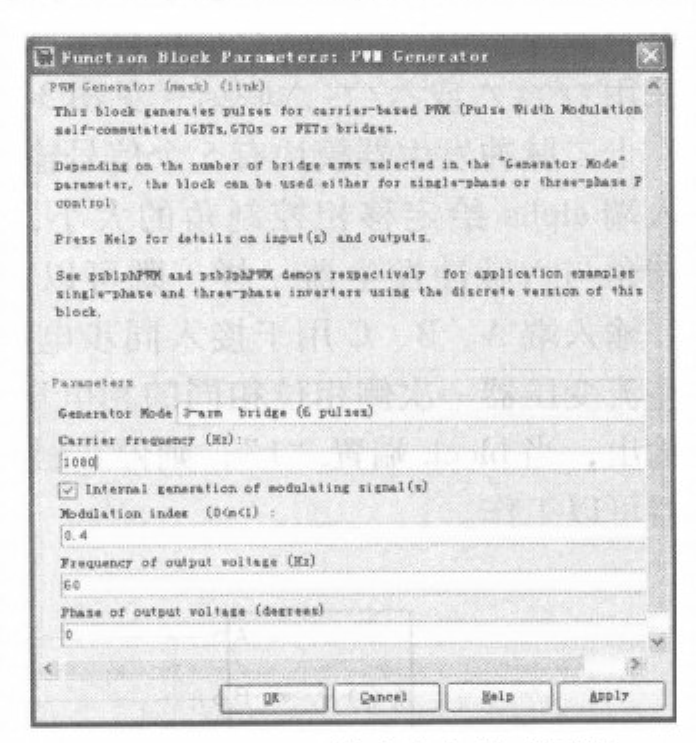


图 3-36 PWM 脉冲发生器对话框

图 3-37 是一相桥式电路采用正弦脉宽调制时的示意图。这时脉冲发生器输出两个脉冲 pulse 1 和 pulse 2，分别对应驱动一相桥（A 相）的上桥臂开关器件 1 和下桥臂的开关器件 2，脉冲 pulse 1 和 pulse 2 是互补的（见图 3-38）。当在对话框中选择二相桥式电路时，脉冲发生器依次输出 4 个脉冲（pulse 1、pulse 2、pulse 3、pulse 4）。当在对话框中选择三相桥式电路时，脉冲发生器依次输出 6 个脉冲（pulse 1、pulse 2、pulse 3、pulse 4 、pulse 5、pulse 6），脉冲 pulse 1 和 pulse 2 用于驱动 A 相桥臂的两个开关器件，pulse 3 和 pulse 4 用于驱动 B 相桥臂的两个开关器件，pulse 5 和 pulse 6 用于驱动 C 相桥臂的两个开关器件，且单数脉冲驱动上桥臂开关器件，双数脉冲驱动下桥臂开关器件，参见图 3-26b 和 c。在使用时只需要将脉冲发生器的 pulse 输出端与多功能桥模块的 pulse 输入端相连接即可。

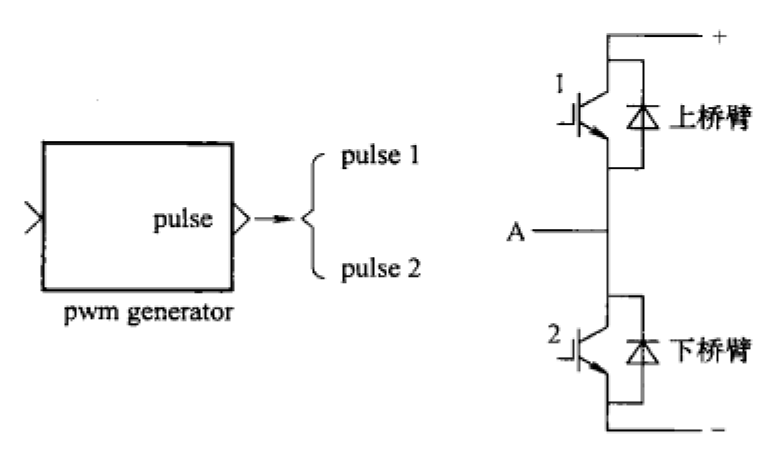


图 3-37 一相桥臂与驱动脉冲

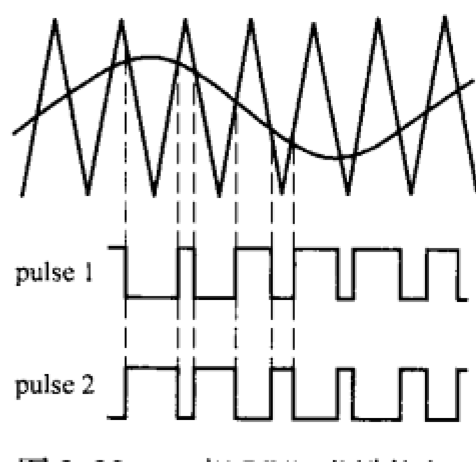


图 3-38 一相 PWM 调制原理



第4章　变压器和电动机模型

4.1　变压器模型

变压器是电力电子电路中经常使用的器件，MATLAB/SIMULINK/POWER SYSTEM 模型库中有多种单相和三相变压器的模型，三相变压器还有多种连接组，并且还有一个带互感的线圈模型，可以作为理想变压器用。

4.1.1　单相变压器模型

MATLAB 的单相变压器模型有两个：一个是线性模型（见图4-1a），一个是考虑了铁心饱和效应的模型（见图4-1b）。下面主要介绍考虑铁心饱和的变压器模型，线性模型与饱和模型相比，只是减少了反映铁心饱和特性的参数。

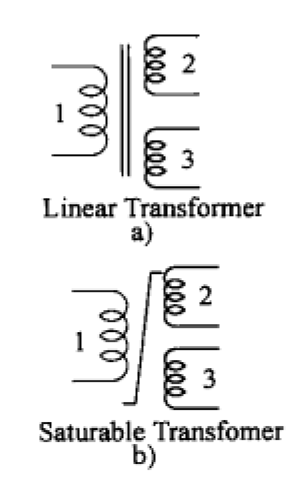


图4-1　单相变压器图标

单相变压器模型电路如图4-2a所示，模型的参数见表4-1，模型中第一个绕组（Winding 1）是变压器的一次绕组，第二、三个绕组（Winding 2、Winding 3）是两个二次绕组。如果未选择 Winding 3 绕组，则模型就只有一个二次绕组，并且模型图标也随之改变。模型中 R_1 和 L_1 为一次绕组电阻和一次绕组漏感，R_2、R_3 和 L_2、L_3 分别为二次侧两个绕组的电阻和漏感。磁阻 R_m 反映了铁心的磁阻损耗，L_{sat}反映铁心的饱和特性。

变压器参数中变压器容量、频率、电压使用标准单位，电阻和电感采用的是标幺值（pu）。标幺值和标准单位的换算为：

$$R(\text{pu}) = \frac{R\ (\Omega)}{R_{\text{base}}}$$

$$L(\text{pu}) = \frac{L\ (\text{H})}{L_{\text{base}}}$$

式中，
$$R_{\text{base}} = \frac{U_1^2}{P_N};\ L_{\text{base}} = \frac{R_{\text{base}}}{2\pi f_N}。$$

变压器的饱和特性用分段线性化的磁化曲线来表述（见图4-3），其中图4-3a为不考虑铁心剩磁作用时的磁化曲线，图4-3b为考虑了铁心剩磁作用的磁化曲线，图中纵坐标是磁通 Φ（phi），横坐标为磁化电流 i，磁通和磁化电流都使用标幺值。在参数对话框中磁化曲线的折点，以与折点对应的磁化电流 i 和磁通 Φ（phi）值依次输入，在电流和磁通间加空格，在两组电流和磁通间以“;”分隔。如果在对话框中选择了测量选项，则磁化电流和磁通都可以被测量，这时测量到的电流和磁通采用的是标准单位。磁化电流和磁通标幺值与标

表 4-1　单相变压器模型参数

单相变压器参数		单　位	单相变压器参数		单　位
额定容量 P_N、频率 f_N		VA、Hz	绕组 3（二次侧 2）	额定电压 U_3	V（有效值）
绕组 1（一次侧）	额定电压 U_1	V（有效值）		电阻 R_3 漏感 L_3	pu（标幺值）
	电阻 R_1 漏感 L_1	pu（标幺值）	饱和特性（线性变压器没有）	磁化电流 i_1、磁通 Φ(phi)（i_1　phi1；i_2 phi2；…）	pu（标幺值）
绕组 2（二次侧 1）	额定电压 U_2	V（有效值）			
	电阻 R_2 漏感 L_2	pu（标幺值）	磁阻和剩磁通（线性变压器没有）	R_m、phi0	pu（标幺值）

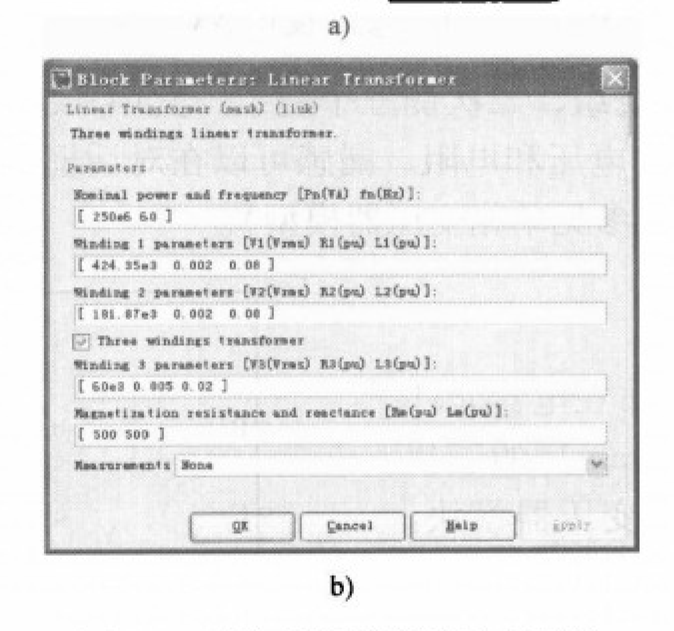
准单位的换算关系为：

$$\Phi = \Phi_{pu}\Phi_{base}$$

$$I = I_{pu}I_{base}$$

式中，$I_{base} = \sqrt{2}P_N/U_1$；$\Phi_{base} = \sqrt{2}U_1/2\pi f_N$

a)



b)

图 4-2　单相变压器模型和对话框

a）单相变压器模型（饱和铁心）　b）单相变压器对话框

图 4-3　变压器磁化曲线

磁阻 R_m 用来等效变压器铁心的损耗，在铁心损耗取 2% 时，则 $R_m = 500$（pu）。如果在该栏中同时给定了剩磁通的标幺值，则变压器仿真从剩磁开始，如果没有给定剩磁通，则变压器仿真开始就是稳态。

4.1.2　单相多绕组变压器

单相多绕组变压器模块（见图 4-4）的一次和二次绕组个数可以按需要设定，并且一次或二次可以有一个绕组带抽头。在其对话框（见图 4-5）中，第一栏设定一次侧的绕组数，第二栏设定二次侧的绕组数，第三栏有无抽头（no taps）、抽头在一次侧（taps on upper lift winding），抽头在二次侧（taps on upper right winding）三种选择。选择了抽头模式，则可以

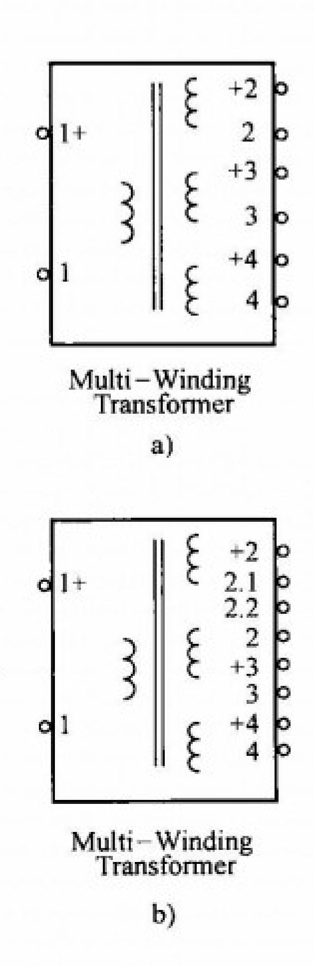



图 4-4 单相多绕组变压器图标

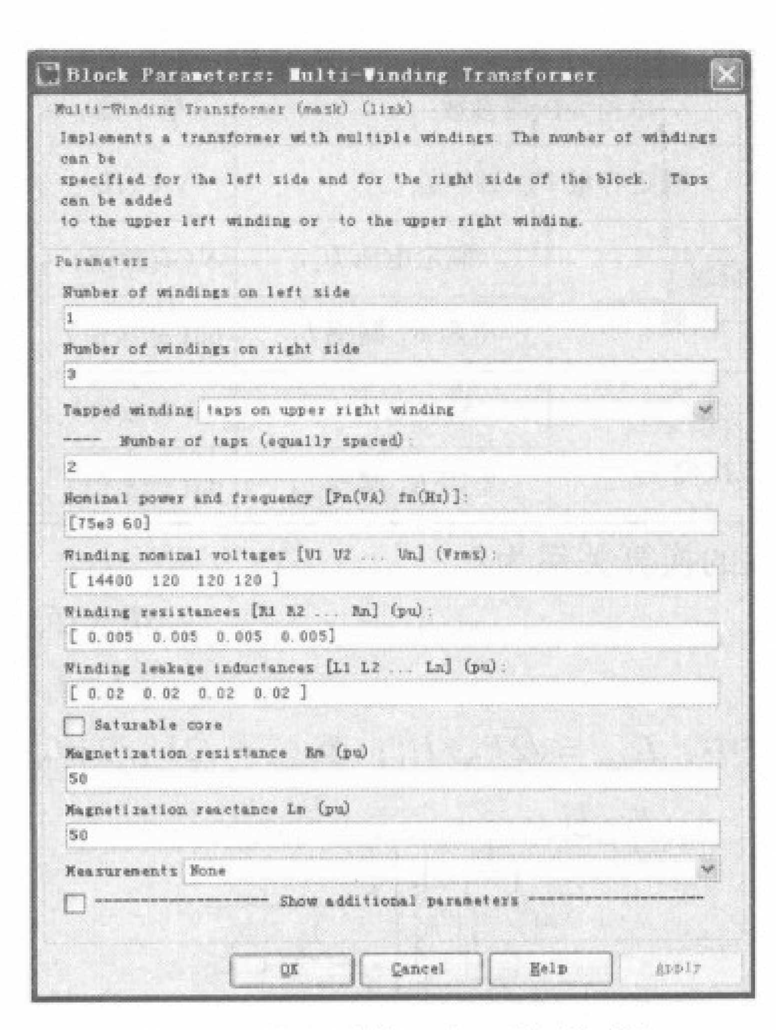


图 4-5 单相多绕组变压器对话框

在第四栏设定抽头数，图 4-4b 是设定一次侧一个绕组，二次侧三个绕组，其中二次侧第一个绕组有两个抽头（2.1，2.2）的情况。各绕组的电压和电阻、漏感可以在对话框中设定。如果选择了饱和铁心，则需要设置铁心磁化参数（参见单相变压器模型）。

4.1.3 三相变压器模型

MATLAB 的三相变压器模型共有 10 余个，分布在电器元件模块库（Elements）和其他电气模块库（Extra Library）的三相模块子集中，这里主要介绍 Elements 库中的两个变压器模块。其中一个有一组三相输入，一组三相输出，称为两绕组三相变压器（见图 4-6a）；另一个是一组三相输入，二组三相输出，称为三绕组三相变压器（见图 4-6b）。变压器的三相绕组无论在一次侧或二次侧都有多种联结组，可以在对话框中根据需要选择。可选择的绕组联结组见表 4-2。

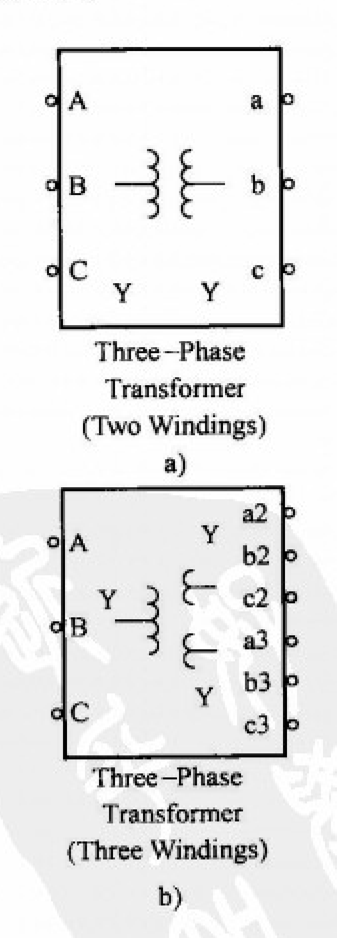


图 4-6 三相变压器图标
a）两绕组 b）三绕组

三相变压器模型实际上是由三个单相变压器模型根据不同的联结组要求连接而成的，因此三相变压器的参数设置与单相变压器相同，其参数对话框如图 4-7 所示。在变压器参数中，变压器容量、电压、频率都使用标准单位制（VA、V、Hz），并且电压都用线电压有效值。电阻、电感都采用标幺值，标准单位与标幺值的换算见单相变压器一节。

三相变压器的铁心有饱和和不饱和两种，这可以在对话框中选择。如果未选饱和铁心一栏，磁路参数有磁阻 Rm 和励磁电

表 4-2　三相变压器的绕组联结

联结符号	三相绕组联结	联结符号	三相绕组联结
Y	星形联结，无中线	Δ_{11}	三角形联结，电压相位领先Y联结 30°
Y_n	星形联结，带中性点的连接端	Δ_1	三角形联结，电压相位滞后Y联结 30°
Y_g	星形联结，中点在模型内接地		

感 *Lm* 两项，这两项都用标幺值。如果选择了饱和铁心一栏，则要求输入铁心磁化曲线的拐点参数。并且如果设置了剩磁通值，变压器仿真从剩磁开始，否则变压器仿真从零状态开始，并可以较快地进入稳态（参见单相饱和变压器）。

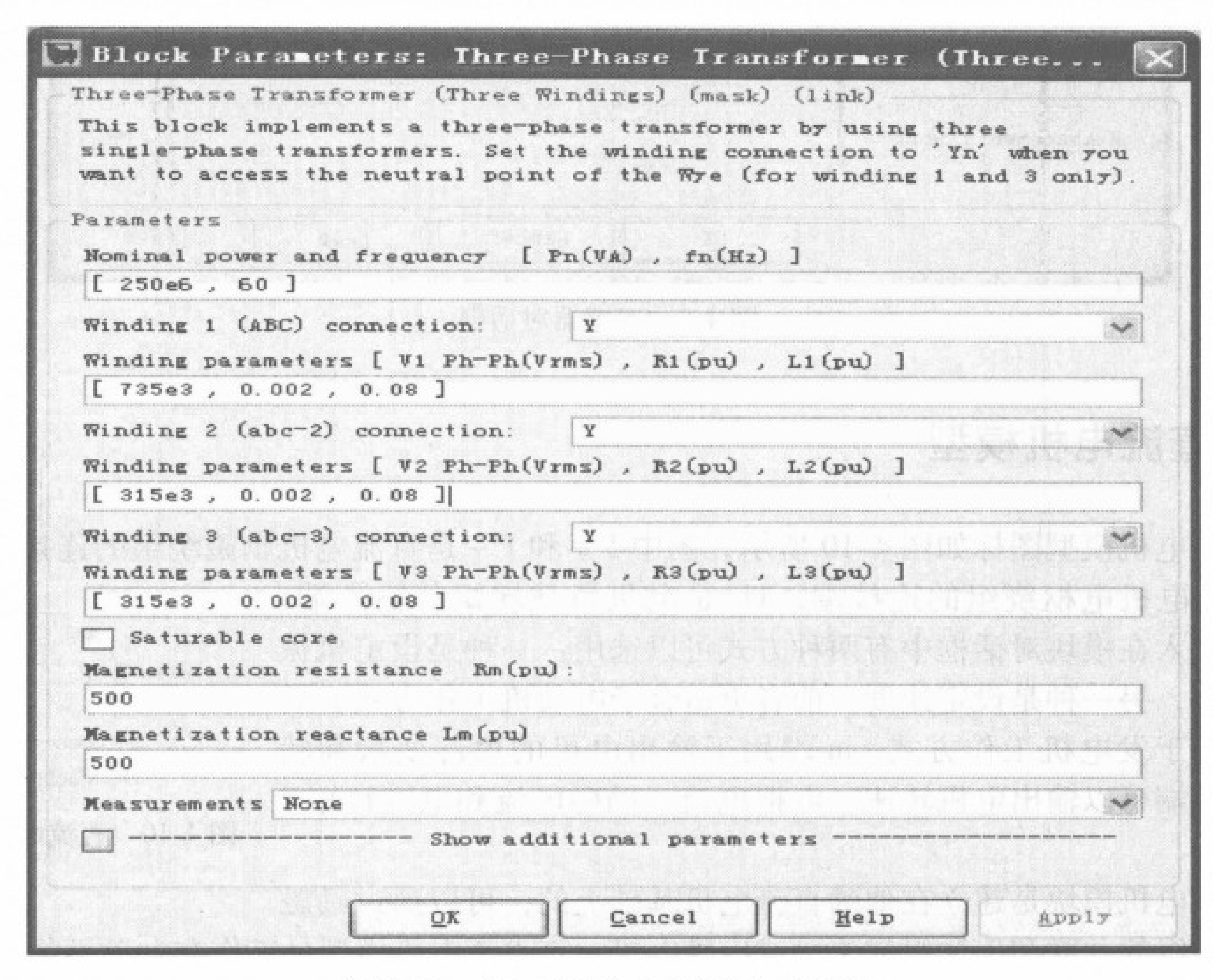


图 4-7　三相变压器（三绕组）对话框

4.1.4　互感线圈

互感线圈是 3 个有互感关系的线圈，这 3 个线圈有互相独立的输入端和输出端，如图 4-8所示。在对话框（见图 4-9）中可以分别设置3 个线圈的电阻和自感，并且可以设置 3 个线圈间的互感，电阻、自感和互感都使用标准单位。

在互感器中如果不设第 3 个线圈的自感，则模型成为两个有互感的线圈，并且图标也随之改变。如果互感参数 Rm、Lm 都取零，则模型表示的是 3 个没有互感关系的独立线圈。互感线圈也是一个简单的变压器模型。

Mutual Inductance

图 4-8　互感线圈图标

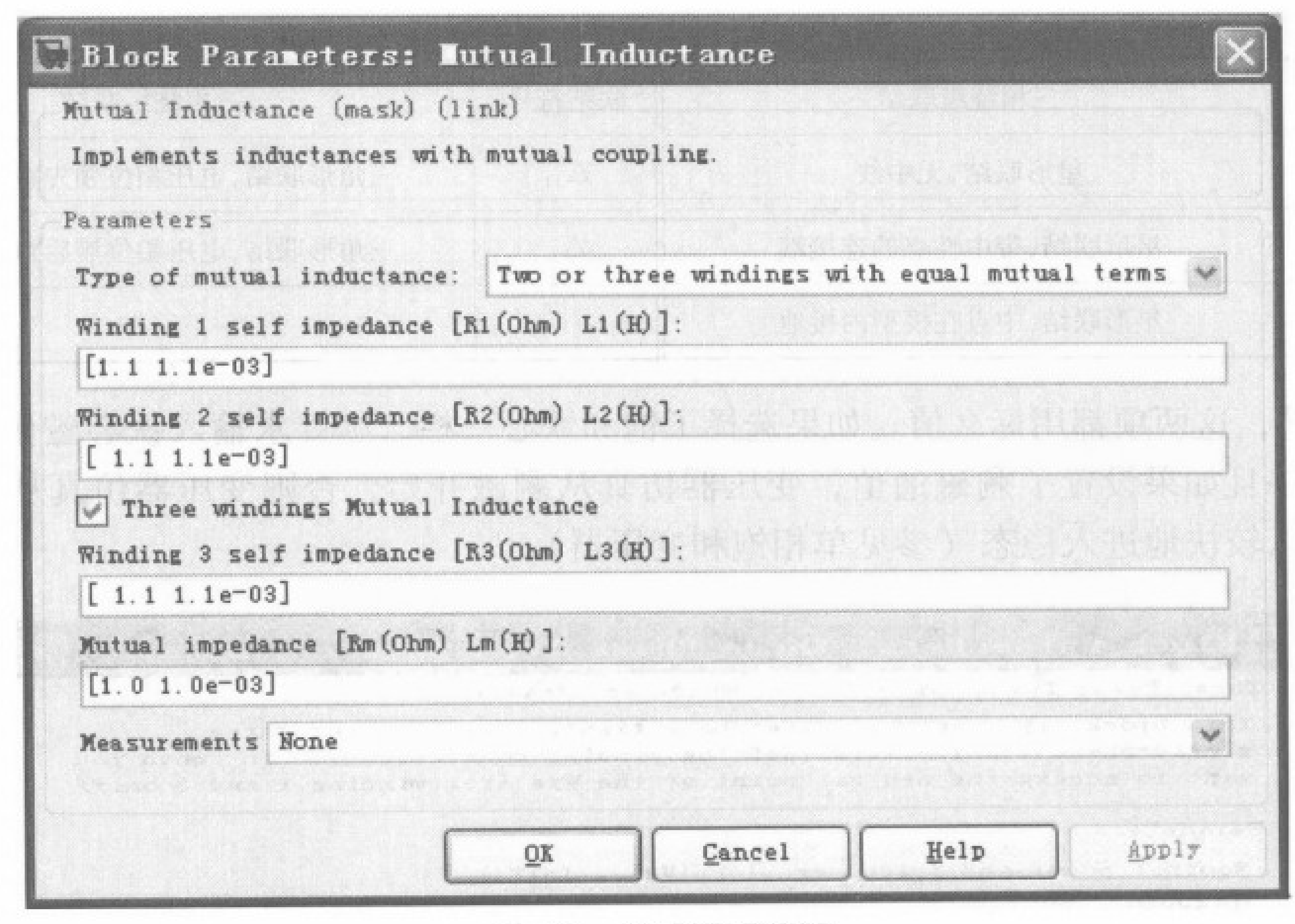


图 4-9　互感器对话框

4.2　直流电机模型

直流电机模型图标如图 4-10 所示，图中 F + 和 F - 是直流电机励磁绕组的连接端，A + 和 A - 是电机电枢绕组的连接端，TL 是电机负载转矩的输入端，该端的输入在模块对话框中有两种方式可以选用：一种是设定机械负载转矩，另一种是设定速度，前者更适合于电动机工作方式，后者更适用于发电机工作方式。m 端用于输出电机的内部变量和状态，在该端可以输出电机转速、电枢电流、励磁电流和电磁转矩 4 项参数。

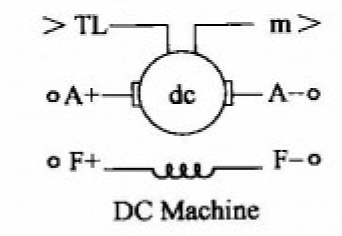


图 4-10　直流电机图标

直流电机模块是建立在他励直流电机基础上的，可以通过励磁和电枢绕组的并联和串联组成并励或串励电机。该直流电机模型是工作在电动机状态还是发电机状态，则是由电机的转矩方向来决定的。直流电机模块的参数对话框如图 4-11 所示，对话框第一栏有 23 种容量不同的电机参数供选用，为仿真提供了很大方便。

直流电机模型如图 4-12 所示。图中 Ra、La 和 Rf、Lf 分别为电枢回路和励磁回路的电阻和电感，Mechanics 模块用于计算电机转矩、转速等参数，Mechanics 模块结构如图 4-13 所示，其模型参数见表 4-3。FCBM 是一个受控源，它将 Mechanics 的计算值转换为电枢回路的电枢反电势。

组成直流电机模型的基本方程为：

励磁回路电压方程：

$$u_F = R_F i_F + L_F \frac{di_F}{dt}$$

式中，u_F、i_F为直流电机励磁电压和电流；R_F、L_F为励磁回路电阻和电感。

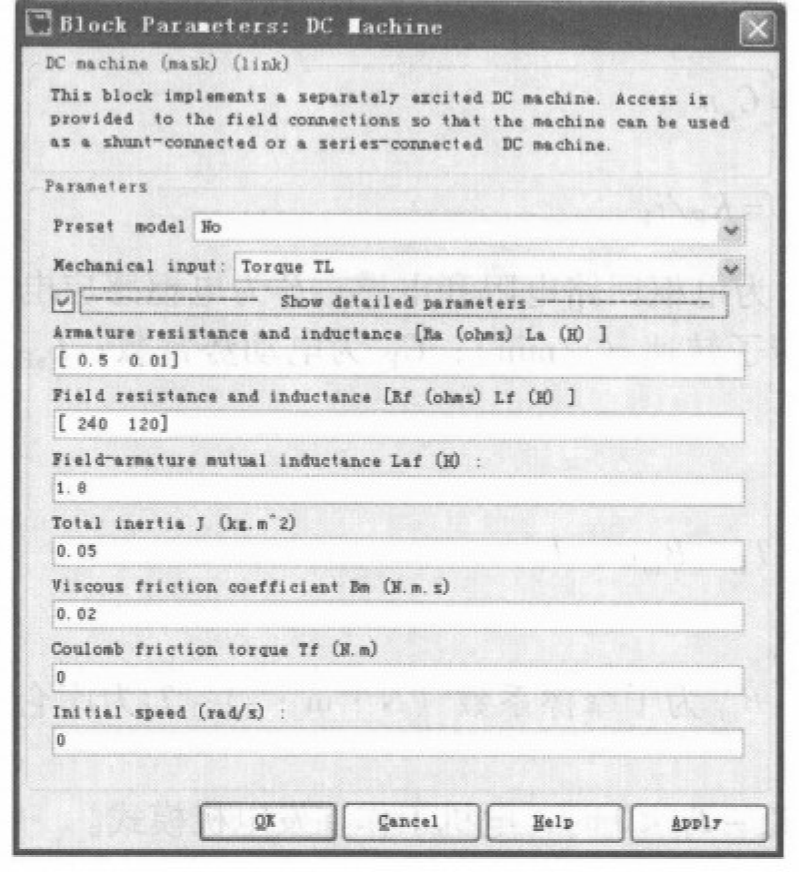


图 4-11　直流电机对话框

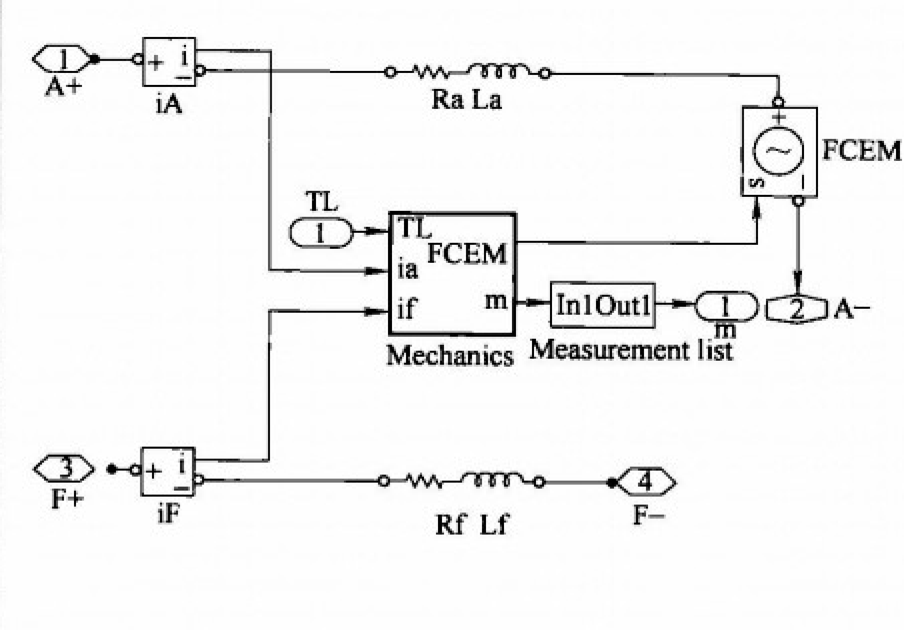


图 4-12　直流电机模型

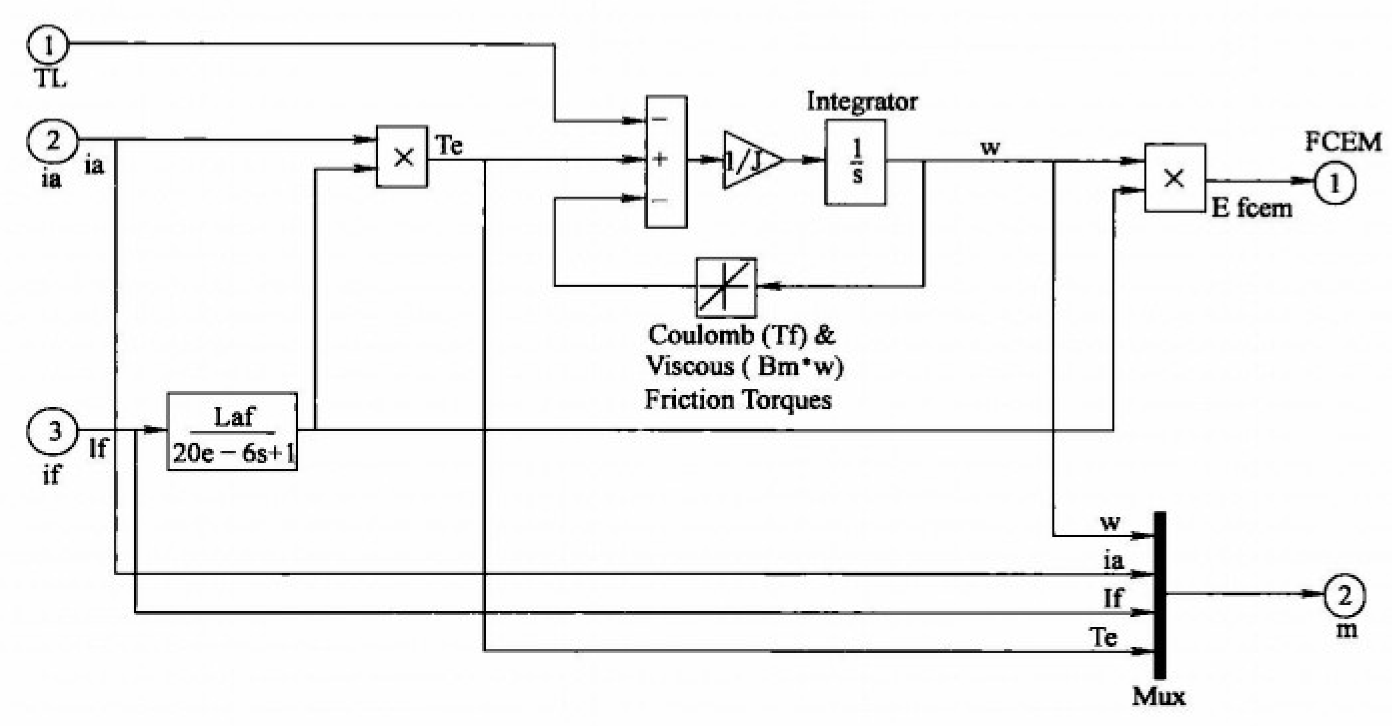


图 4-13　Mechanics 模块结构

表 4-3　他励直流电机模型参数

参　　数	单　　位	参　　数	单　　位
电枢电阻 R_a	Ω(欧姆)	粘滞摩擦系数 B_m	N · m · s
电枢电感 L_a	H(亨利)	干摩擦转矩 T_f	N · m
励磁和电枢互感 L_{af}	H(亨利)	初始速度	rad/s
转动惯量 J	kg · m²		

电枢回路电压方程：

$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E$$

$$E = K_E \omega$$

或

$$E = \frac{2\pi}{60} K_E n = C_e n$$

$$K_E = \frac{60}{2\pi} C_e \quad L_{aF} = K_E / i_F$$

式中，u_a、i_a为直流电机电枢电压和电流；R_a、L_a为电枢回路电阻和电感；E 为电枢感应电动势；ω 为电机转子机械角速度（rad/s）；n 为转子转速（r/min）；C_E 为电动势常数；L_{aF} 为磁场和电枢绕组间互感。

电机转矩方程：

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - \text{sgn}(\omega)\ T_L - B_m \omega - T_f$$

$$T_e = K_T i_a$$

式中，T_e 为电磁转矩；J 为转动惯量（$kg \cdot m^2$）；B_m 为干摩擦系数（N · m · s）；T_f为库仑摩擦转矩（N · m）；K_T 为转矩系数，$K_T = K_E$。

当 $T_e - T_L > 0$ 时，电机工作在电动机模式；$T_e - T_L < 0$ 时，电机工作在发电机模式。

【例 4-1】 仿真一台直流并励电动机的起动过程。电动机参数为：$P_N = 17kW$，$U_N = 220V$，$n_N = 3000r/min$，电枢回路电阻 $R_a = 0.087\Omega$，电枢电感 $L_a = 0.0032H$，励磁回路电阻 $R_F = 181.5\Omega$，电机转动惯量 $J = 0.76kg \cdot m^2$。

1）建立并激电动机的仿真模型：模型如图 4-14 所示，直流电动机 DCmotor 的电枢和励磁并联后由直流电源 DC 供电，用 Step 模块给定电动机的负载转矩，在 DCmotor 的 m 端连接了 Demux 模块，将 m 端输出的 4 个信号分为 4 路，以便通过示波器 Scope 观察，m 端输出的转速单位为 rad/s，这里使用了一个放大器（Gain），将 rad/s 转换为习惯的 r/min，变换系数为：$k = \frac{60}{2\pi} = 9.55$。

模型中各模块提取路径见表 4-4。

2）计算电动机参数：

励磁电流

$$I_f = U_f / R_f = (220/181.5)A = 1.21A$$

励磁电感在恒定磁场控制时可取“0”

电枢电阻

$$R_a = 0.087\Omega$$

电枢电感估算

$$L_a = 19.1 \times \frac{CU_{nom}}{2pn_{nom}I_{nom}} = 19.1 \times \frac{0.4 \times 220}{2 \times 1 \times 3000 \times 88.9} H = 0.0032H$$

电枢绕组和励磁绕组的互感 L_{af}：

因为 $$C_e = \frac{U_{nom} - R_a I_{nom}}{n_{nom}} = \frac{220 - 0.087 \times 88.9}{3000} V \cdot min/r = 0.0708V \cdot min/r$$

$$K_E = \frac{60}{2\pi} C_e = \frac{60}{2\pi} \times 0.0708 = 0.676$$

所以 $$L_{af} = K_E / I_f = (0.676/1.21)H = 0.56H$$

额定负载转矩：

$$T_L = 9.55C_e I_{nom} = (9.55 \times 0.0708 \times 88.9)\text{N}\cdot\text{m} = 60.1\text{N}\cdot\text{m}$$

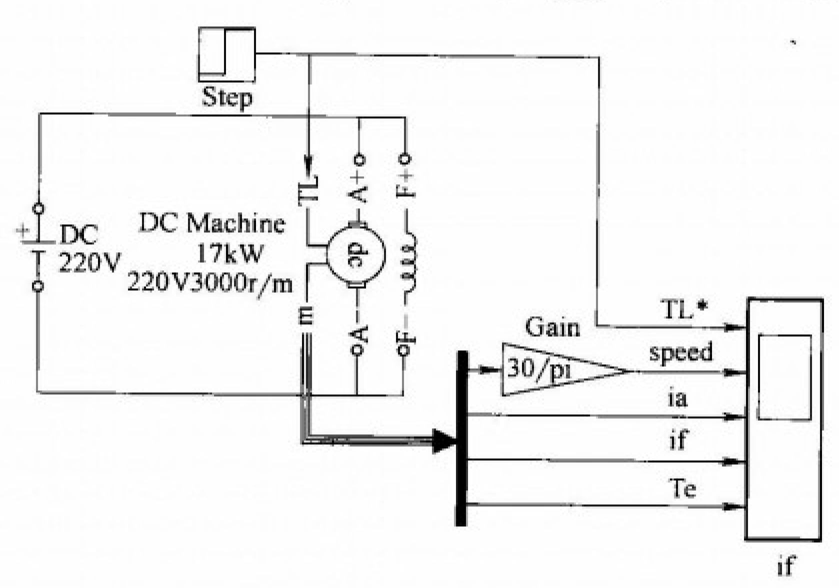


图 4-14　直流电动机直接起动仿真模型

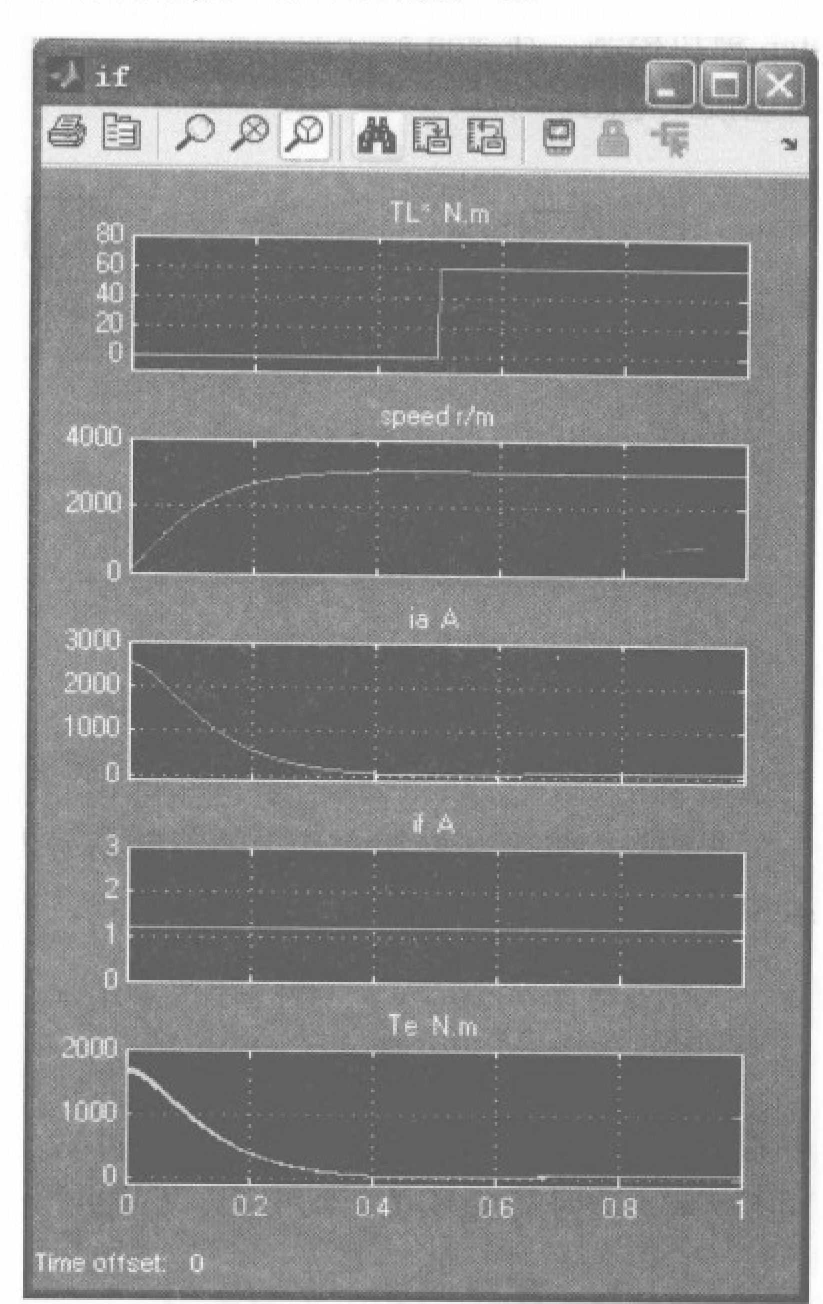


图 4-15　直流电动机直接起动波形

3）设置仿真参数：在 Simulation 菜单栏下选择 Simulation parameters，设置仿真参数，仿真时间取 1s，在 0.5s 时加额定负载，仿真算法取 ode45，点击菜单栏中的“▶”按钮启动仿真。

4）波形观察：双击 Scope 模块，得到电动机的波形，如图 4-15 所示，从上往下为给定的负载转矩 TL*、电动机转速 n、电枢电流 ia、励磁电流 if 和电磁转矩 Te。从波形可见，虽然是空载起动，但起动电流很大，达到 2500A 左右，当转速从 0 上升达到 3100r/min 时，电枢电流减小到 0，在 0.5s 时电机加载，电机转速略有下降，电枢电流增加，电磁转矩 Te 上升，当 Te 与负载转矩 TL* 平衡时，转速稳定在 3000r/min。电机转矩与电枢电流的波形类似，因为电磁转矩正比于电枢电流，但是单位不同。

表 4-4　直流电动机直接起动仿真线路模块

模　块　名	提 取 路 径	备　　注
直流电机 DC motor	SimPower system/machines	
直流电源 DC	SimPower system/Electrical sources	
阶跃信号 Step	Simulink/sources	用于施加负载转矩，设为空载起动，0.5s 时加载 60.1 N·m
放大模块 Gain	Simulink/Math operations	将转速单位 rad/s 变换为 r/min
信号分解 Demux	Simulink/Singnals & system	
示波器 Scope	Simulink/Sinks	

【例 4-2】　在上题中，如果要用电阻起动器限制起动电流在 200 ~ 100A 之间，通过仿真设计选择起动电阻和切换时间。

步骤1：在上题直接起动线路基础上，在电枢回路中串联一个由三电阻组成的起动器（见图4-16）。在每个电阻（R_1、R_2、R_3）上并联了一个理想开关，用于切除电阻，开关受step模块控制。在step模块对话框中设定单位阶跃信号发生时刻，即可控制开关的闭合，从而短接该电阻。

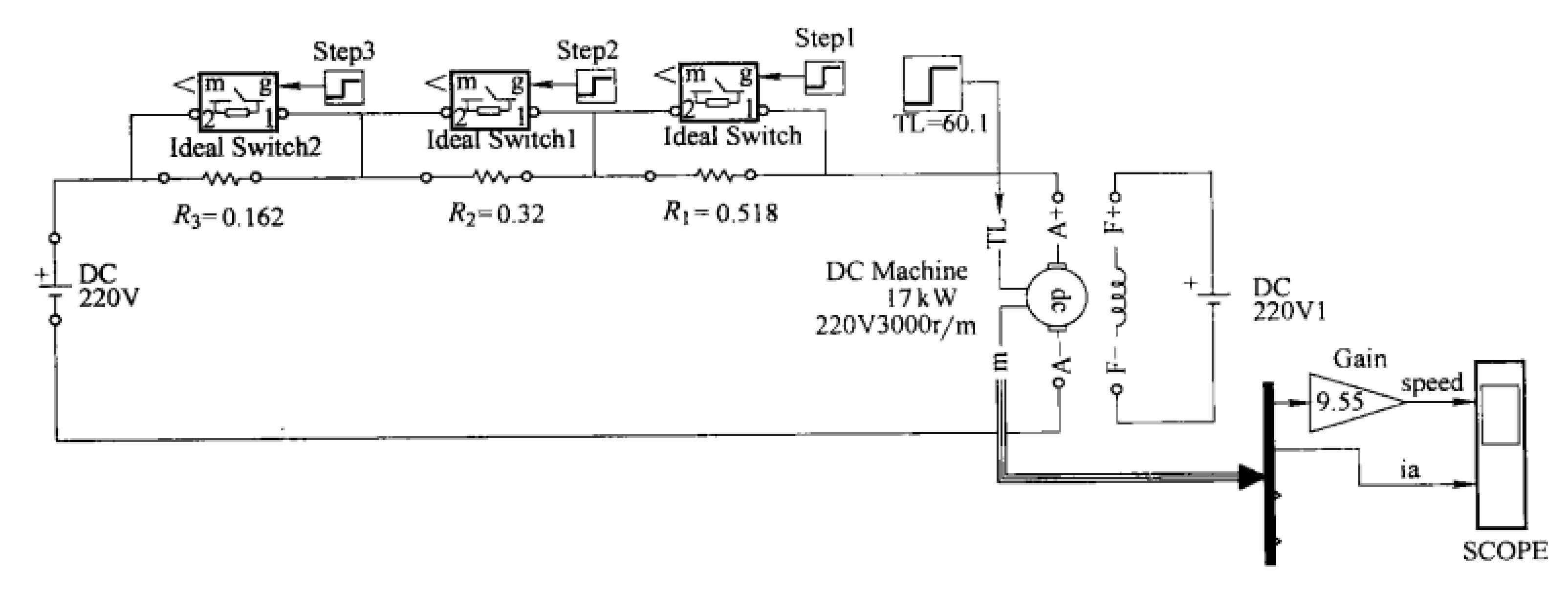


图4-16 直流电动机串电阻起动模型

步骤2：将step模块2和3的阶跃信号发生时间设为"0"，即R_2、R_3在起动时就短接；step1的信号发生时间设长一些（如20s），使R_1接入电枢回路，并初选R_1的值R_1'

$$R_1' = \frac{U_N}{I_{max}} - R_a = \left(\frac{220}{200} - 0.087\right)\Omega \approx 1\Omega$$

在模型中设$R_1 = R_1' = 1\Omega$，启动仿真，得到转速和电流波形如图4-17a所示，在图中可以看到串联电阻后最大起动电流为200A，在3.5s时电流下降到100A，对应的转速约为1500r/m，这时需要减小起动电阻，因此可计算R_1的值R_1和预选R_2的值R_2'。

$$R_2' = \frac{U_N - C_e n}{I_{max}} - R_a = \left(\frac{220 - 0.0708 \times 1500}{200} - 0.087\right)\Omega = 0.482\Omega$$

$$R_1 = R_1' - R_2' = (1 - 0.482)\Omega = 0.518\Omega$$

步骤3：重新设定R_1、R_2的值R_1和R_2（$R_2 = R_2'$）并设step1的信号发生时间为3.5s，设step2的信号发生时间为20s。再次仿真得到如图4-17b所示的波形，在起动后6s电流再次下降到100A，这时的转速在2200r/min，需要再次减小起动电阻。计算R_2和R_3的值R_2和R_3。

$$R_2 = \frac{U_N - C_e n}{I_{max}} - R_a = \left(\frac{220 - 0.0708 \times 2200}{200} - 0.087\right)\Omega = 0.32\Omega$$

$$R_3 = R_2' - R_2 = (0.482 - 0.32)\Omega = 0.162\Omega$$

步骤4：重新设定R_2和R_3的值R_2、R_3，并设step2的信号发生时间为6s，设step3的信号发生时间为20s，再次仿真，得到图4-17c所示的波形。在起动8s后电流再次下降到100A，对应的转速在2800r/min，需要再次减小起动电阻，即切除R_3，因此可以设step3的信号发生时间为8s，再次仿真，得到图4-17d所示的波形，在切除R_3后，转速升到3000r/min，在整个起动过程中，电流都限制在规定的范围内，起动器的电阻和切换时间设计完毕。

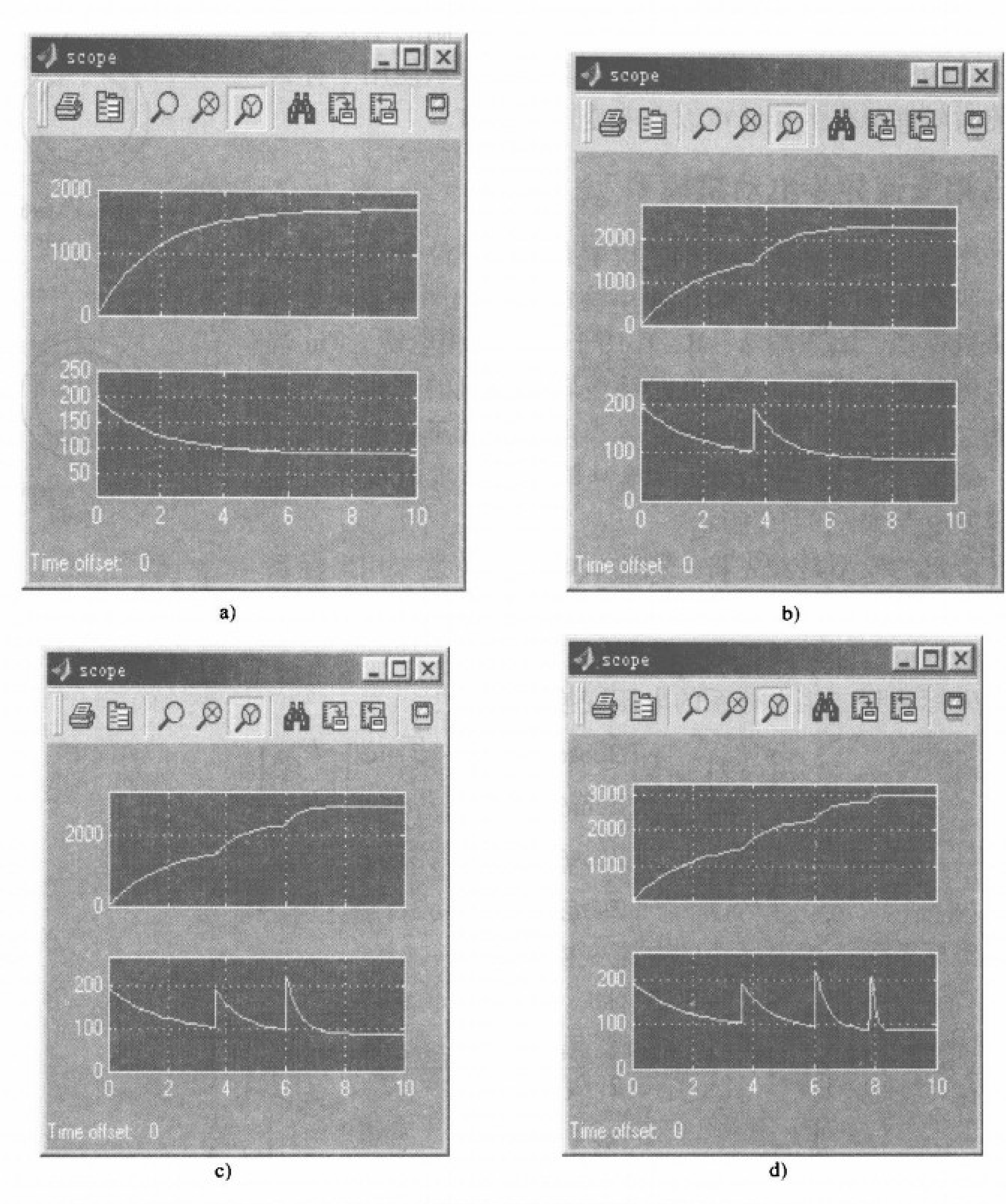


图 4-17　串电阻起动时的转速和电流波形

4.3　交流电机模型

交流电机有异步电机和同步电机两类，其中异步电机有笼型和绕线转子两种，同步电机有永磁式和线圈励磁等多种。交流电机的模型比较复杂，在 power system 元件库中有各种交流电机的模型。交流电机模型建立在二相坐标系基础上，通过模型的 m 端不仅可以观测到在三相坐标系上和二相坐标系上表达的电流、转矩和转速等参量，还可以观测到电机的磁场，使用是很方便的。交流电机的模型既可以工作在电动状态，也可以工作在发电状态。主要区别在输入机械转矩的方向，输入机械转矩与电机转向相反，且机械转矩小于电磁转矩，电机工作于电动机状态；输入机械转矩与电机转向相同，且机械转矩大于电磁转矩，电机工作于发电机状态。交流电机的模型有使用标准单位制（SI）和标幺值单位制（pu）的两种，

这里主要介绍使用标准单位制的模型，标幺值单位制的电机模型与标准单位制的模型相同，不同仅在于，参数的表示使用了标幺值。标幺值与标准单位的换算可以参考变压器一节。

4.3.1 三相交流异步电动机模型

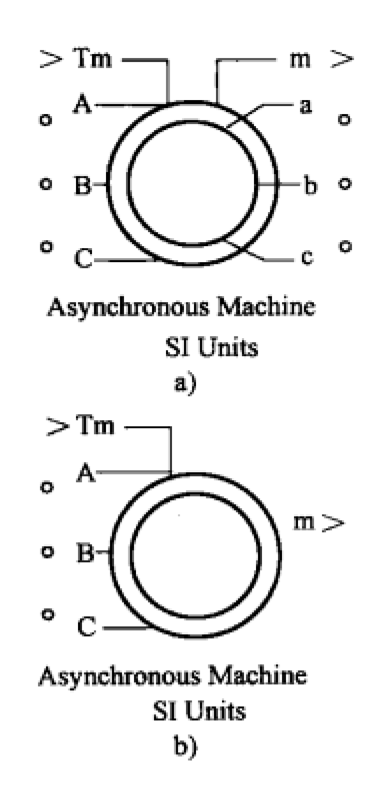


图 4-18 异步电机图标
a）绕线转子异步机 b）笼型异步机

在元件库中，交流异步电动机的模型有标准单位（SI）和标幺值（pu）两种，图 4-18 是采用 SI 单位的模型，图 4-18a 是绕线转子异步机模型，输入端 A、B、C 用于连接三相电源，Tm 端用于输入机械转矩，输出 a、b、c 是绕线转子电机的三相转子绕组的外接端。如图 4-18b 所示是笼型异步电机，转子绕组在模型内部短接，输出端 m 用于连接电机测量单元。异步电机在二相坐标上的等效电路如图 4-19 所示。

三相异步机的模型是首先将三相输入电压变换为二相坐标系（dq 坐标系）上的电压，同时也将计算所得的二相电流变换为三相坐标系上的电流，变换关系如下：

从三相坐标系到二相坐标系的电压变换

$$\begin{bmatrix} U_{qs} \\ U_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2\cos\theta & \cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta \\ 2\sin\theta & \sin\theta - \sqrt{3}\cos\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U_{abs} \\ U_{bcs} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U'_{qr} \\ U'_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2\cos\beta & \cos\beta + \sqrt{3}\sin\beta \\ 2\sin\beta & \sin\beta - \sqrt{3}\cos\beta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} U'_{abr} \\ U'_{bcr} \end{bmatrix}$$

从二相坐标系到三相坐标系的电流变换

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \dfrac{-\cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta}{2} & \dfrac{-\sqrt{3}\cos\theta - \sin\theta}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i'_{ar} \\ i'_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ \dfrac{-\cos\beta + \sqrt{3}\sin\beta}{2} & \dfrac{-\sqrt{3}\cos\beta - \sin\beta}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix}$$

$$i_{cs} = -i_{as} - i_{bs}$$

$$i'_{cr} = -i'_{ar} - i'_{br}$$

式中，θ 为二相坐标系与定子三相坐标系的位置角；$\beta = \theta - \theta_r$ 为二相坐标系与转子三相坐标系的位置角。

建立在二相坐标系上的异步电机方程为：

电压方程为

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt}\psi_{qs} + \omega\psi_{ds}$$

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt}\psi_{ds} - \omega\psi_{ds}$$

$$U'_{qr} = R'_{qr} i'_{qr} + \frac{d}{dt}\psi'_{qr} + (\omega - \omega_r)\psi'_{dr}$$

$$U'_{dr}=R'_{dr}i'_{dr}+\frac{d}{dt}\psi'_{dr}-(\omega-\omega_r)\psi'_{qr}$$

其中

$$\psi_{qs}=L_s i_{qs}+L_m i'_{qr}$$
$$\psi_{ds}=L_s i_{ds}+L_m i'_{qr}$$
$$\psi'_{qr}=L'_r i'_{qr}+L_m i_{qs}$$
$$\psi'_{dr}=L'_r i'_{dr}+L_m i_{ds}$$
$$L_s=L_{ls}+L_m$$
$$L'_r=L'_{lr}+L_m$$

电磁转矩为

$$T_e=1.5p(\psi_{ds}i_{qs}-\psi_{qs}i_{ds})$$

机械方程为

$$\frac{d}{dt}\omega_m=\frac{1}{2H}(T_e-F\omega_m-T_m)$$

$$\frac{d}{dt}\theta_m=\omega_m$$

式中，R_s、L_{ls}为定子电阻和漏感；R'_r、L'_{lr}为转子电阻和漏感；L_m 为定转子互感；L_s、L'_r为定子和转子自感；U_{qs}、i_{qs}为定子电压和电流在 q 轴上的分量；U'_{qr}、i'_{qr}为转子电压和电流在 q 轴上的分量；U_{ds}、i_{ds}为定子电压和电流在 d 轴上的分量；U'_{dr}、i'_{dr}为转子电压和电流在 d 轴上的分量；ψ_{qs}、ψ_{ds}为定子磁链的 q 轴和 d 轴分量；ψ'_{qr}、ψ'_{dr}为转子磁链的 q 轴和 d 轴分量；ω_m 为转子角速度；θ_m 为转子位置角；p 为电机极对数；ω_r 为转子角频率（$\omega_m\times p$）；θ_r 为转子位置电角度（$\theta_m\times p$）；T_e 为电磁转矩；J 为转子和负载的转动惯量；H 为转子和负载的惯性常数；F 为摩擦系数。

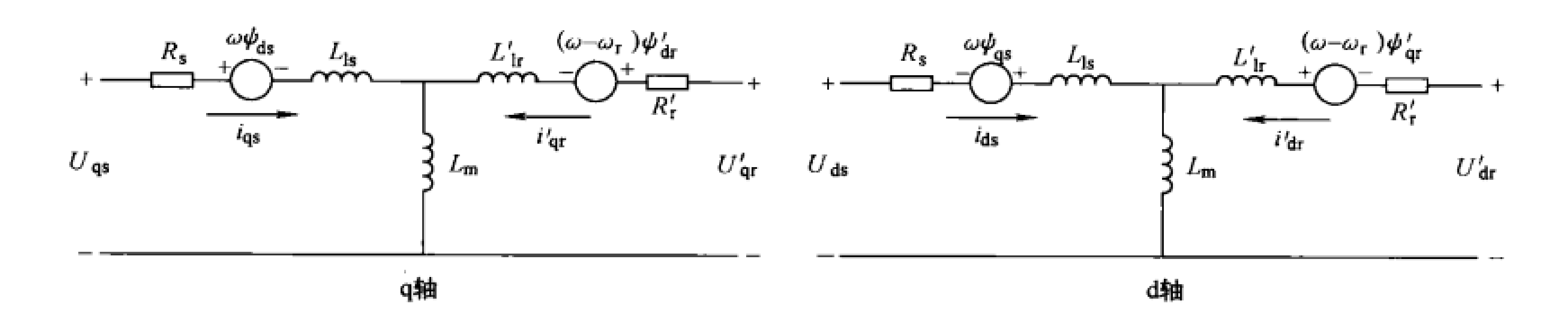


图 4-19　异步电机在二相坐标系上的等效电路

异步电机的参数设置对话框如图 4-20 所示。在对话框中第一项是转子类型的选择，其中有绕线转子（Wound）和笼型（Squirrel-cage）两种可选。第二项是参考坐标系，其中有旋转坐标系（Rotor，Park 变换）、静止坐标系（Stationary，$\alpha\beta$ 变换）和同步旋转坐标系（Synchronous）三种可选择。电机的参数见表 4-5。

在电机参数中转子参数（电阻和漏感）都折算到定子侧，初始条件包括转差率 s、电角度、定子电流大小和相位等。

三相异步电机模型没有考虑定转子铁心的饱和问题。

在异步电机模块的测量端可测量的参数有转子电流、定子电流、转子磁链、定子磁链、转速和转矩等。

4.3.2 交流同步电机模型（基本型）

同步电机模型图标如图4-21所示，同步电机模型既可以工作在电动机状态，也可以工作在发电机状态。模块的输入端Pm用于输入电机轴上的机械功率，在电动机工作状态时，该端一般是连接一个常数模块或函数模块，使电机负载机械功率以常数或函数形式输入；如果电机工作于发电机状态，则该端连接常数模块、函数模块或原动机模块（水轮机和调速器、蒸汽轮机和调速器）。第二个输入端Vf用于接入励磁电压，在电动机状态一般是连接常数模块，励磁电压以常数表示；如果是发电机状态，则可以连接励磁系统模块（Excitation system block）。模块的输出端A、B、C为三相定子的接线端，输出端m用于连接电机的测量模块。

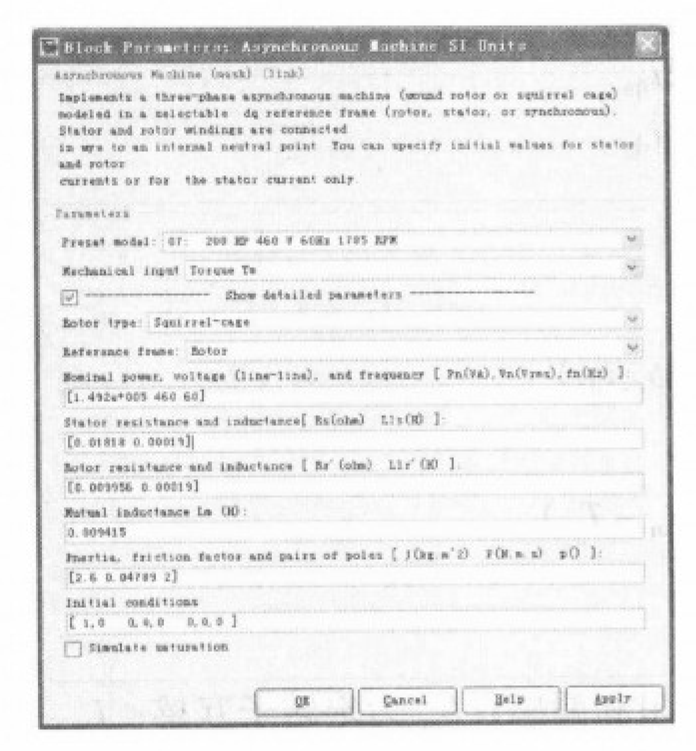


图4-20 异步电机对话框

表4-5 异步电机参数

参 数 名	单 位
额定容量 P_n、额定电压 U_n、额定频率 f_n	VA、V、Hz
定子绕组电阻 R_s、漏感 L_{ls}	Ω、H
转子绕组电阻 R_r'、漏感 L_{lr}'	Ω、H
定转子绕组互感 L_m	H
转动惯量 J、摩擦系数 F、极对数 p	kg · m²
初始条件	

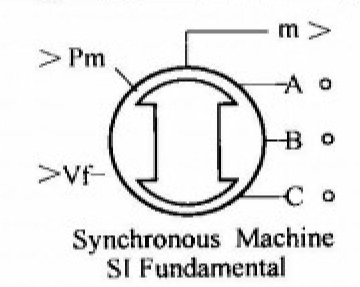


图4-21 同步电机模块图标

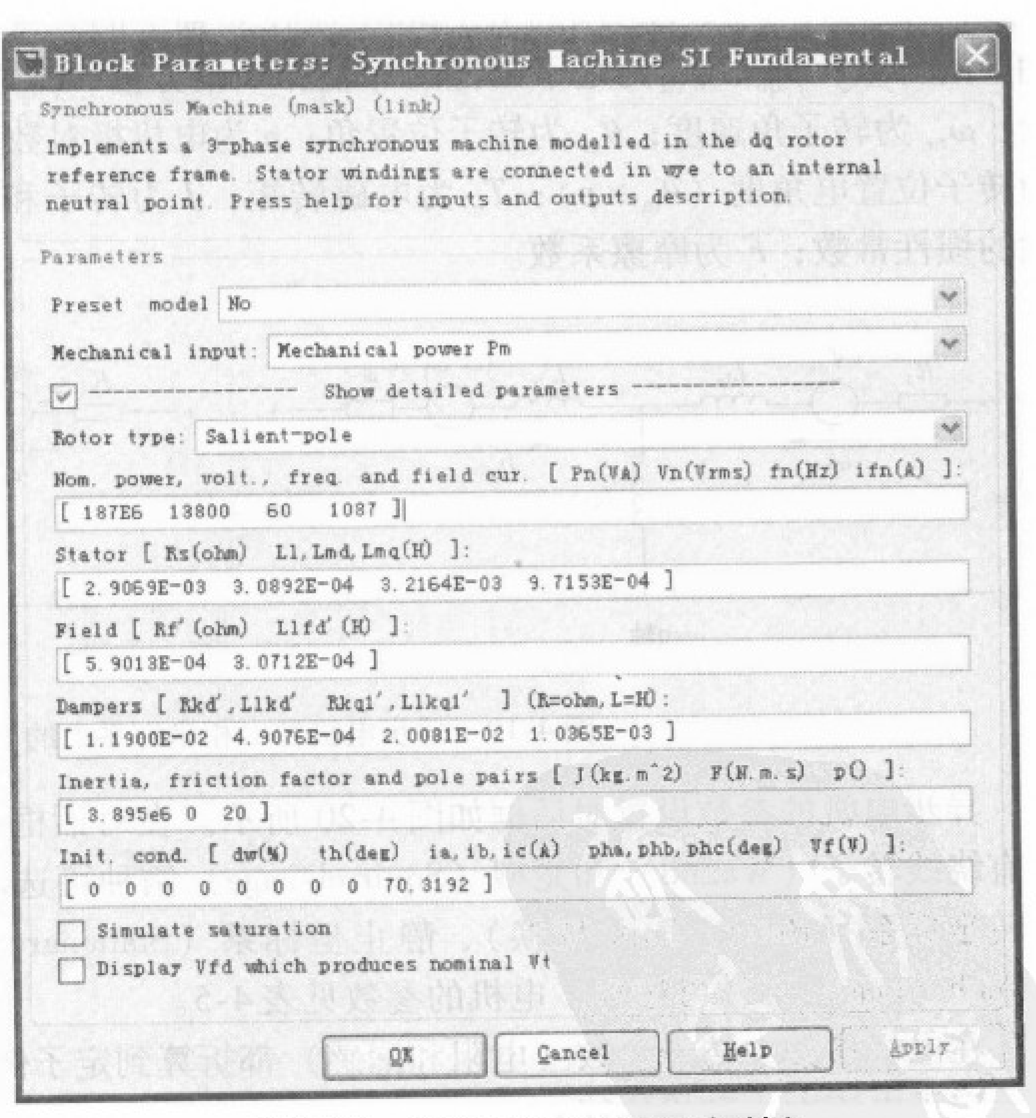


图4-22 同步电机参数设置对话框

双击模块可以弹出模型的对话框（见图4-22），对话框中第一栏中有24种规格电机可供选择，第二栏有容量和速度两种输入方式选择。如果选择了详细参数，则转子有凸型（salient）和绕线转子（round）

两种选择，对话框中以下各栏用于设置同步电机的参数，见表 4-6。

同步电机的数学模型建立在二相旋转 dq 坐标系上，模型反映了定子磁场和阻尼绕组的动态过程。同步电机动态模型在二相坐标系上的等值电路如图 4-23 所示，图中转子参数都折算到定子一侧。

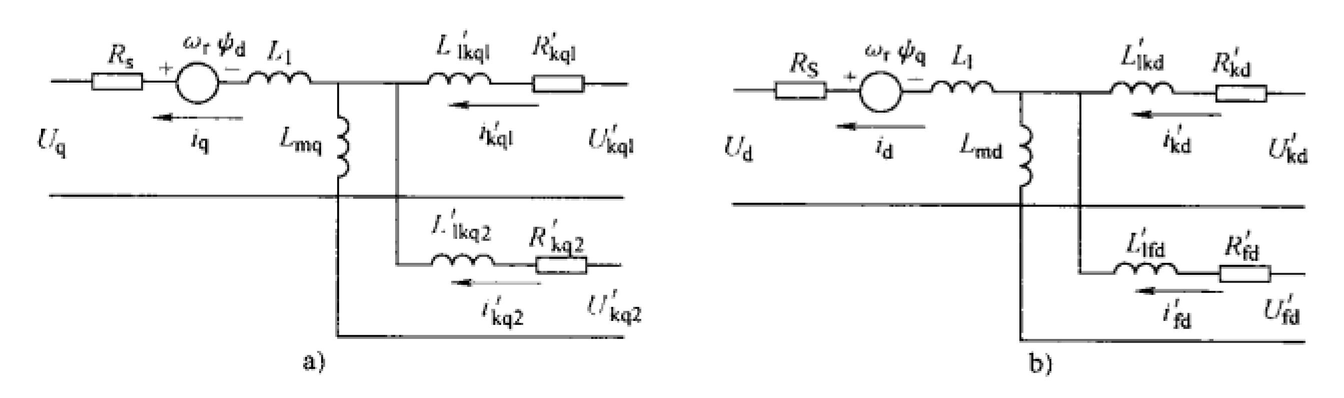


图 4-23　同步机模型等值电路

a）q 轴　b）d 轴

电压方程

$$u_d = R_s i_d + \frac{d}{dt}\psi_d - \omega_r\psi_q$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d}{dt}\psi_q + \omega_r\psi_d$$

$$u'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d}{dt}\psi'_{fd}$$

$$u'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d}{dt}\psi'_{kd}$$

$$u'_{kq1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d}{dt}\psi'_{kq1}$$

$$u'_{kq2} = R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d}{dt}\psi'_{kq2}$$

磁链方程

$$\psi_d = L_d i_d + L_{md}\ (i'_{fd} + i'_{kd})$$

$$\psi_q = L_q i_q + L_{mq} i'_{kq}$$

$$\psi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md}(i_d + i'_{kd})$$

$$\psi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md}(i_d + i'_{fd})$$

$$\psi'_{kq1} = L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{mq} i_q$$

$$\psi'_{kq2} = L_{kq2} i'_{kq2} + L_{mq} i_q$$

式中，变量下标 d、q 为 d 轴和 q 轴分量；r、s 为转子或定子参数；l、m 为漏感或励磁电感；f、k 为磁场或阻尼绕组。

表 4-6　同步电机模型参数

同步电机参数		单　位	同步电机参数		单　位
电机额定参数 Norminal	容量 P_N	VA	阻尼绕组	d 轴电阻 R'_{kd}、漏感 L'_{lkd}	Ω、H
	线电压 U_N	V(有效值)	dampers	q 轴电阻 R'_{kq1}、漏感 L'_{lkq1}	
	频率 f_N	Hz		对隐极机还有电阻 R'_{kq2}、漏感 L'_{lkq2}	
	励磁电流 i_{fN}	A	机械参数	转动惯量 J	kg · m²
定子 stator	电阻 R_s	Ω		摩擦系数 D	N · m · s/rad
	漏感 L_{ls}	H		极对数	
励磁绕组 field	电阻 R'_f	Ω	初始条件		
	漏感 L'_{lfd}	H			

同步电机的初始条件包括初始速度 dw，转子角 θ_e（电角度°），线电流 i_a、i_b、i_c，相角 pha、phb、phc（°）和励磁电压 U_f，其中初始速度以额定转速的百分数（%）表示。关于

励磁电压的设定，有两种情况：如果在额定参数一栏中设定了励磁电流 i_{fN}，则初始励磁电压（直流）是参考于转子侧的，并且这个参考电压可以从对话框最后一栏（dislay　Vfd…）中得到，只要点击该栏则可弹出提示框，框中给出了 U_t 的值（见图4-24）。如果在额定参数一栏中没有设定励磁电流 i_{fN}，即该项取“0”，则励磁电压是参考于定子的，参考于定子的励磁电压同样可以从点击对话框最后一栏得到。

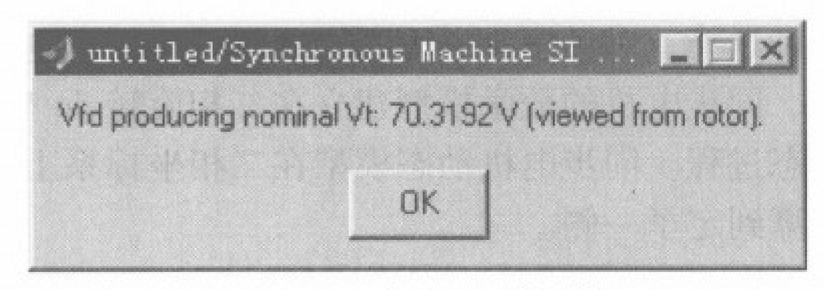


图4-24　励磁电压提示框

同步电机模型可以考虑铁心的饱和现象，这时只要选中参数设置对话框的最后第二栏 simulate saturation。铁心的饱和是以饱和曲线来表示的（见图4-25），曲线的横坐标是励磁电流 i_{fd}，纵坐标为励磁电压 U_t，在曲线上选择 n 个点，将各点对应的 i_{fd1}、i_{fd2}…i_{fdn} 和 U_{t1}、U_{t2}…U_{tn} 依次输入对话框中即可。如果不需要考虑铁心的饱和，就不要选中该项，这时铁心按线性考虑。

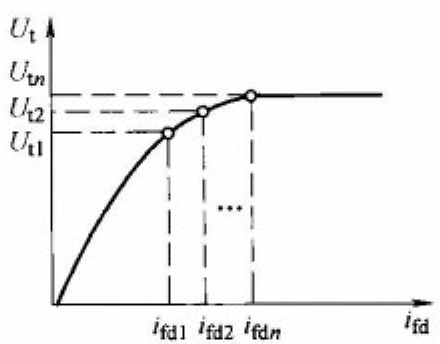


图4-25　铁心饱和曲线

通过同步电机模块的测量端 m 可以观测电机的22项参数，它们分别为：

1）1~3：定子电流 i_{sa}、i_{sb}、i_{sc}。

2）4~5：q 轴和 d 轴定子电流 i_{sq}、i_{sd}。

3）6：磁场电流 i_{fd}。

4）7~9：阻尼绕组电流 i_{kq1}、i_{kq2}、i_{kd}。

5）10~11：q 轴和 d 轴磁链 ψ_{mq}、ψ_{md}。

6）12~13：q 轴和 d 轴电压分量 U_q、U_d。

7）14：转子角 $\varDelta\theta$，即功率角 δ。

8）15：转子角速度 ω。

9）16：电磁功率 P_e。

10）17：转子速度偏差 dω。

11）18：转子机械转角 θ。

12）19：电磁转矩 T_e。

13）20：负载角 δ。

14）21：输出有功 P_{eo}。

15）22：输出无功 Q_{eo}。

4.3.3　永磁同步电机模型

永磁同步电机模块的图标如图4-26所示。该模块有4个输入端，一个输出端，其中输入端 A、B、C 连接三相电压；输入端 Tm 接入机械转矩信号，该端信号在电机模块对话框中有转矩和速度两种方式可以选择。输出端 m 用于测量和观察同步电机的工作状态。

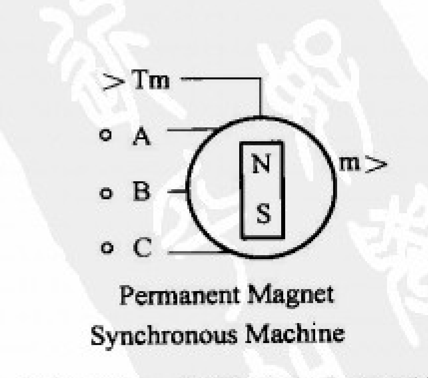
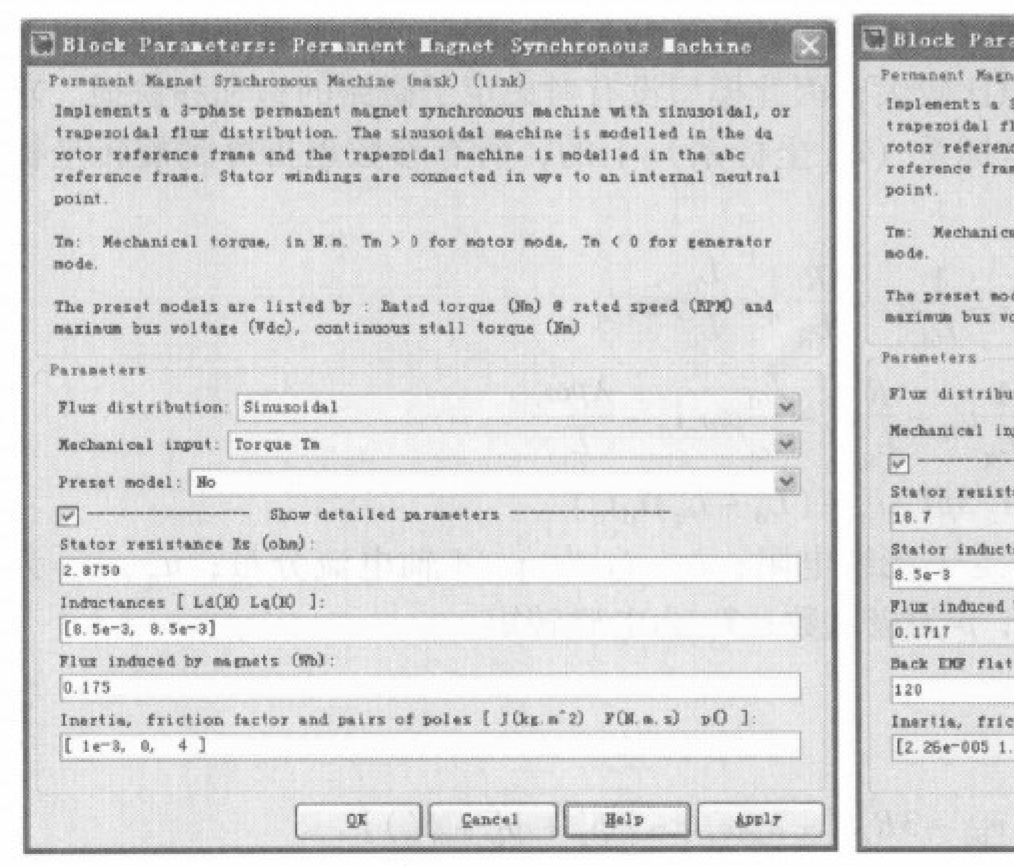


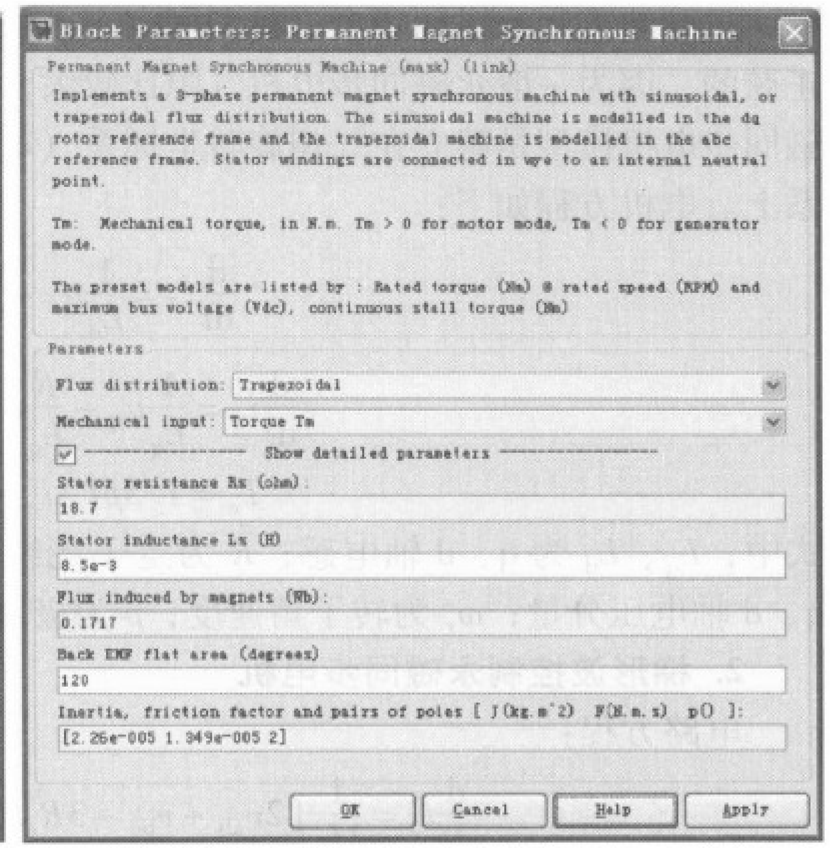
图4-26　永磁同步电机图标

永磁同步电机转子是永久磁铁，磁通有正弦波和梯形波两种模式，这两种模式在模块对

话框中可以选择，图 4-27a 是选择正弦波磁通（Sinousoidal）时的电机对话框，图 4-27b 是选择梯形波磁通（Trapezoidal）时的电机对话框，梯形波控制永磁同步电机也称无刷直流电机。永磁同步机模型参数见表 4-7，表 4-8 是可测量参数的列表。



a)



b)

图 4-27　永磁同步电机参数对话框

a）正弦波磁通　b）梯形波磁通

表 4-7　永磁同步电机模型参数

参　数　名	单　位	参　数　名	单　位
定子电阻 R	Ω（欧姆）	转子和负载的转动惯量 J	$kg \cdot m^2$
定子电感 L_d、L_q（dq 轴系）	H（亨利）	粘滞摩擦系数 F	$N \cdot m \cdot s$
由永磁转子在定子回路产生的磁通 λ	Wb（韦伯）	电机极对数 p	

表 4-8　永磁同步电机可测量参数

参　数　名	单　位	参数编号		参　数　名	单　位	参数编号	
		正弦波	梯形波			正弦波	梯形波
定子 A 相电流 i_a	A	1	1	定子 B 相反电动势 e_b	V	—	5
定子 B 相电流 i_b	A	2	2	定子 C 相反电动势 e_c	V	—	6
定子 C 相电流 i_c	A	3	3	霍尔效应信号 h_a	Logic0-1	8	7
d 轴电流 i_d	A	4	—	霍尔效应信号 h_b	Logic0-1	9	8
q 轴电流 i_q	A	5	—	霍尔效应信号 h_c	Logic0-1	10	9
d 轴电压 u_d	V	6	—	转子机械角速度 ω_r	rad/s	11	10
q 轴电压 u_q	V	7	—	转子位置角 θ_r	rad	12	11
定子 A 相反电动势 e_a	V	—	4	电磁转矩 T_m	N. m	13	12

永磁同步电机模型可以工作于发电机或电动机方式，它的工作方式取决于输入机械转矩的极性，如果输入机械转矩为正，则工作在电动机方式，如果输入机械转矩为负，则工作在发电方式。

1. 正弦波控制永磁同步电机模型

正弦波控制永磁同步电机模型假定定子磁通是正弦分布的，因此产生的感应电动势也是正弦的，因为一般永磁同步电机气隙比较大，因此模型没有考虑定子磁路的饱和和铁损。永磁同步电机模型是建立在二相旋转坐标系（dq 坐标系）上的，所有参数也折算到旋转坐标系上。电机方程如下：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i_{\mathrm{d}}=\frac{1}{L_{\mathrm{d}}}u_{\mathrm{d}}-\frac{R}{L_{\mathrm{d}}}i_{\mathrm{d}}+\frac{L_{\mathrm{q}}}{L_{\mathrm{d}}}p\omega_{\mathrm{r}}i_{\mathrm{q}}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i_{\mathrm{q}}=\frac{1}{L_{\mathrm{q}}}u_{\mathrm{q}}-\frac{R}{L_{\mathrm{q}}}i_{\mathrm{q}}-\frac{L_{\mathrm{d}}}{L_{\mathrm{q}}}p\omega_{\mathrm{r}}i_{\mathrm{d}}-\frac{\lambda p\omega_{\mathrm{r}}}{L_{\mathrm{q}}}$$

$$T_{\mathrm{e}}=1.5p[\lambda i_{\mathrm{q}}+(L_{\mathrm{d}}-L_{\mathrm{q}})i_{\mathrm{d}}i_{\mathrm{q}}]$$

式中，L_{q}、L_{d} 为 q、d 轴电感；R 为定子绕组电阻；i_{q}、i_{d} 为 q、d 轴电流分量；u_{q}、u_{d} 为 q、d 轴电压分量；ω_{r} 为转子角速度；p 为极对数；T_{e} 为电磁转矩。

2. 梯形波控制永磁同步电机

电路方程：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i_{\mathrm{a}}=\frac{1}{3L_{\mathrm{s}}}[2v_{\mathrm{ab}}+v_{\mathrm{bc}}-3R_{\mathrm{s}}i_{\mathrm{a}}+\lambda p\omega_{\mathrm{r}}(-2\phi_{\mathrm{a}}'+\phi_{\mathrm{b}}'+\phi_{\mathrm{c}}')]$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i_{\mathrm{b}}=\frac{1}{3L_{\mathrm{s}}}[-v_{\mathrm{ab}}+v_{\mathrm{bc}}-3R_{\mathrm{s}}i_{\mathrm{b}}+\lambda p\omega_{\mathrm{r}}(\phi_{\mathrm{a}}'-2\phi_{\mathrm{b}}'+\phi_{\mathrm{c}}')]$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i_{\mathrm{c}}=-\left[\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i_{\mathrm{a}}+\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}i_{\mathrm{b}}\right]$$

式中，L_{s} 为定子绕组电感；R_{s} 为定子绕组电阻；i_{a}、i_{b}、i_{c}为三相电流；ϕ_{a}'、ϕ_{b}'、ϕ_{c}'为三相感应电动势；ω_{r} 为转子角速度；p 为极对数；T_{e} 为电磁转矩；λ 为永磁转子对定子的磁通系数。

永磁同步电机的机械方程：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\omega_{\mathrm{r}}=\frac{1}{J}(T_{\mathrm{e}}-F\omega_{\mathrm{r}}-T_{\mathrm{m}})$$

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\omega_{\mathrm{r}}$$

式中，J 为转子和负载的转动惯量；F 为转子和负载的摩擦系数；θ 为转子位置角；T_{m} 为轴上机械转矩。

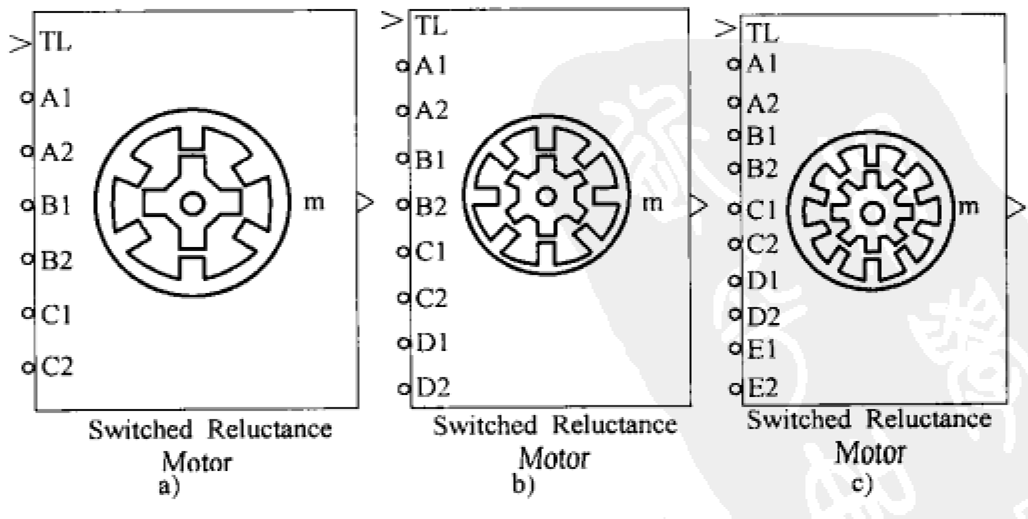


图 4-28　磁阻电机图标
a) 6/4　b) 8/6　c) 10/8

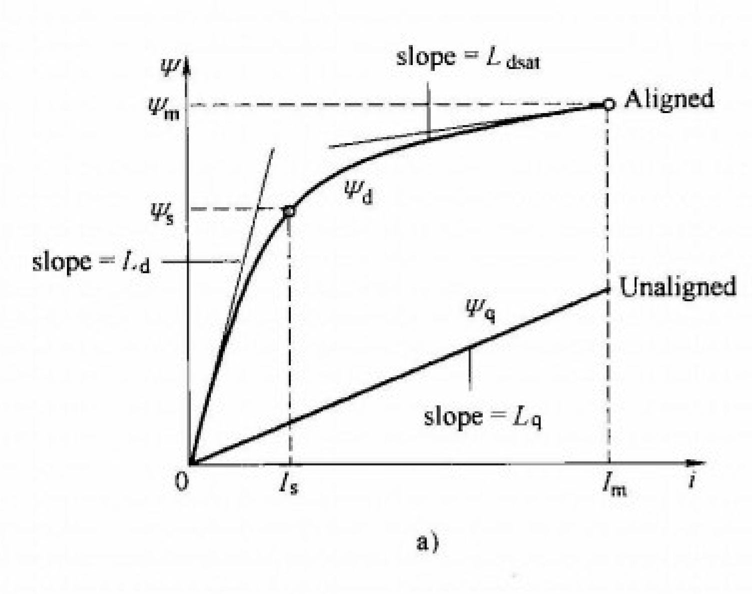
4.3.4　磁阻电机模型

开关磁阻电机（Switched Reluctance Motor）是一种根据磁路有使磁通磁阻最小原理设计的电动机，其定子和转

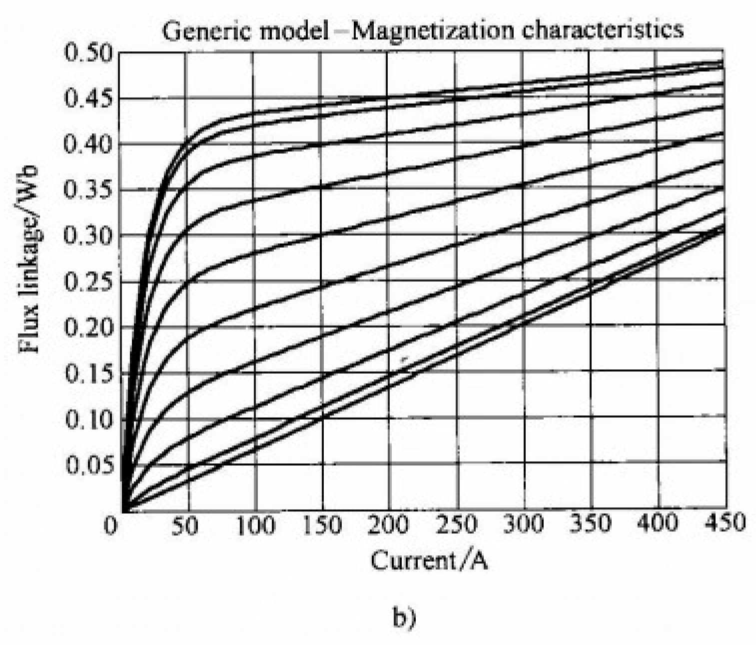
子都有硅钢片叠成的凸极，转子上没有绕组或永磁体，定子上绕有集中绕组，径向相对的两个绕组串联，组成一对磁极，称为一相，相数多，步距角小，有利于减小转矩脉动，但是开关多控制复杂。目前常用的开关磁阻电机有三相定子极数/转子极数为 6/4，四相定子极数/转子极数为 8/6，五相定子极数/转子极数为 10/8 几种，其仿真模块图标如图 4-28所示。

开关磁阻电机绕组的电感随转子位置变化是非线性的，由 $L=\frac{\mathrm{d}\psi(\theta,\ i)}{\mathrm{d}i}$可知，绕组电感可以用随转子位置角 θ 和相电流 i 周期变化的一簇磁化曲线 $\psi(\theta,\ i)$ 的斜率（slope）来表示（见图 4-29a）。磁化曲线对磁阻电机模型很重要，SIMULINK 的磁阻电机有两种模型：一种是专用模型，其电机磁化特性通过 lookup table 表格提供，表中参数由试验或计算得到；另一种是基本模型，通过参数对话框中设置的基准电感 Aligned inductance（Ld）和非基准电感 Unaligned inductance（Lq）、最大电流和最大磁通来计算得到磁化特性。

磁阻电机模块的参数设置如图 4-30 所示，在对话框的第一栏是电机类型的选择。第二栏选择电机模型，有基本型（Generic）和专用型（Specific）两种选择。选择了第三栏 Plot magnetization curves 可以绘制磁化曲线（见图 4-29b）。电机模型的参数见表 4-9。



a)



b)

图 4-29　磁化曲线

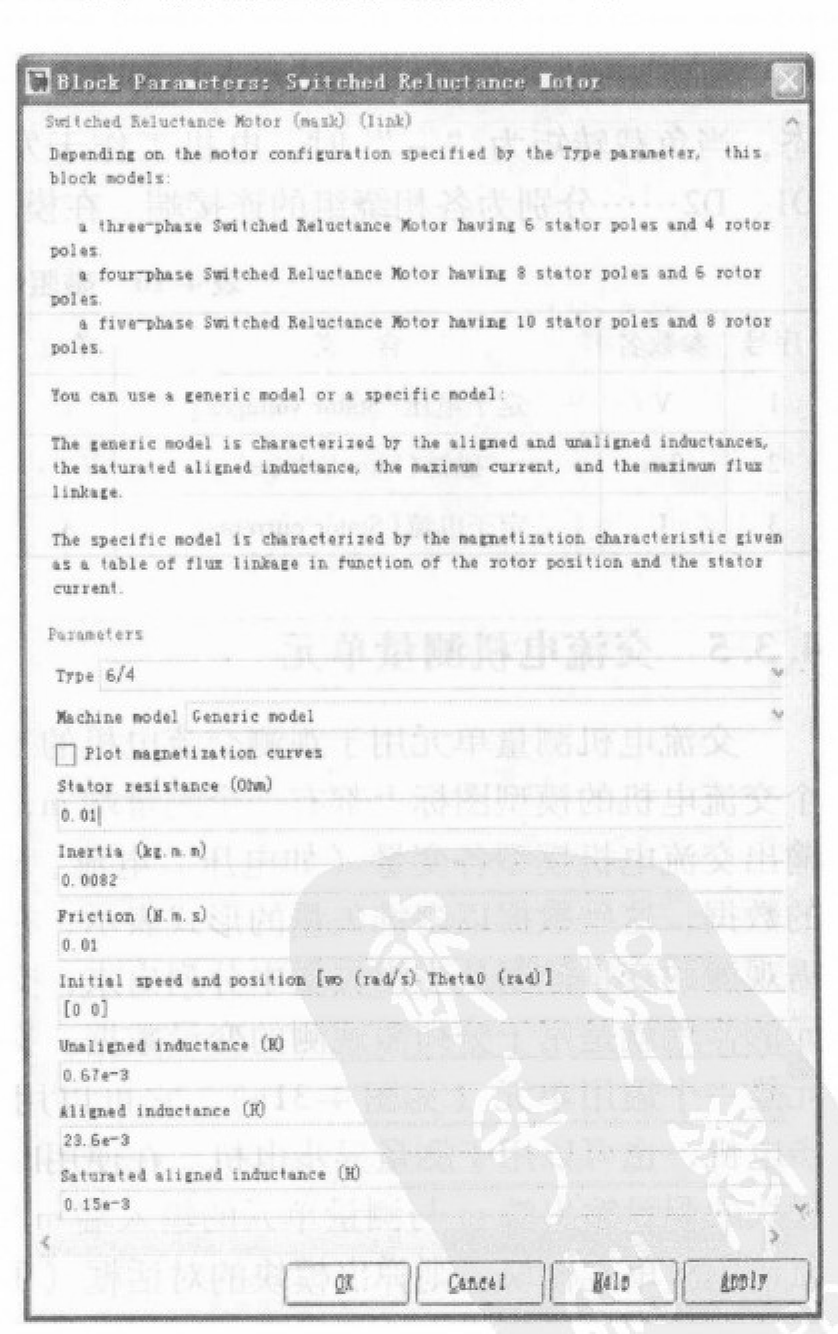


图 4-30　SRM 参数对话框

表 4-9　磁阻电机模型参数

参　数　名		单　　位	说　　明
定子绕组电阻(Stator resistance)		Ω	
转动惯量(Inertia)		$kg \cdot m^2$	
摩擦系数(Friction)		N·m·s	
转子初始值(Initial)	初始速度(Speed)	rad/s	
	初始位置(Position)	rad	
基准电感(Aligned inductance)		H	基本型模型(Generic)
非基准电感(Unaligned inductance)		H	
基准电感饱和值(Saturated aligned inductance)		H	
最大电流(Maximum current)		A	
最大磁通(Ψ_m)(Maximum flux linkage)		V·s	
磁化曲线表(Magnetization characteristic table)		表格名.mat	专用模型(Specific)
转角向量(Rotor angle vector)		degrees	
定子电流向量(Stator current vector)		A	

磁阻电机模块的输入端 TL 是负载转矩，当负载转矩为“+”时，电机工作于电动状态，当负载转矩为“-”时，电机工作于发电状态。输入端 A1、A2，B1、B2，C1、C2，D1、D2……分别为各相绕组的连接端。在模块的输出端 m 可以输出的参数见表 4-10。

表 4-10　磁阻电机模块输出变量

序号	参数名	含　义	单位	序号	参数名	含　义	单位
1	V	定子电压(Stator voltages)	V	4	Te	电磁转矩(Electromagnetic torque)	N·m
2	flux	磁链(Flux linkage)	V·s	5	w	转子速度	rad/s
3	I	定子电流(Stator currents)	A	6	teta	转子位置角	rad

4.3.5　交流电机测量单元

交流电机测量单元用于观测交流电机的工作情况。在每个交流电机的模型图标上都有一个测量端 m，通过该端可以输出交流电机模型各变量（如电压、电流、转速、磁链等）的数据，这些数据以多维矢量的形式表示，在使用中需要将需观测的变量数据从多维矢量中分列出来，交流电机测量单元的作用就是用于分列需观测的变量数据。交流电机测量单元是一个通用单元（见图 4-31a），它可以用于测量交流同步电机，也可以用于测量异步电机。在使用时，只要将电机模块的测量输出端 m 与测量单元的输入端 m 连接起来即可。双击测量单元模块，则弹出模块的对话框（见图 4-32），在对话框的电机类型栏中选择需要观测的电机后，在该栏下方即会出现这种电机可观测的各项变量，可以根据需要点击各

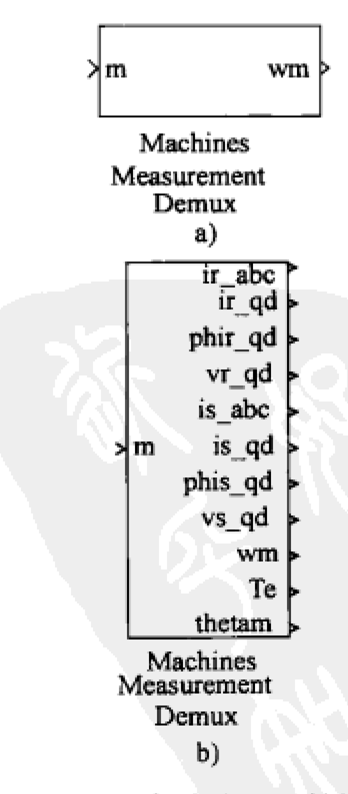


图 4-31　交流电机测量单元

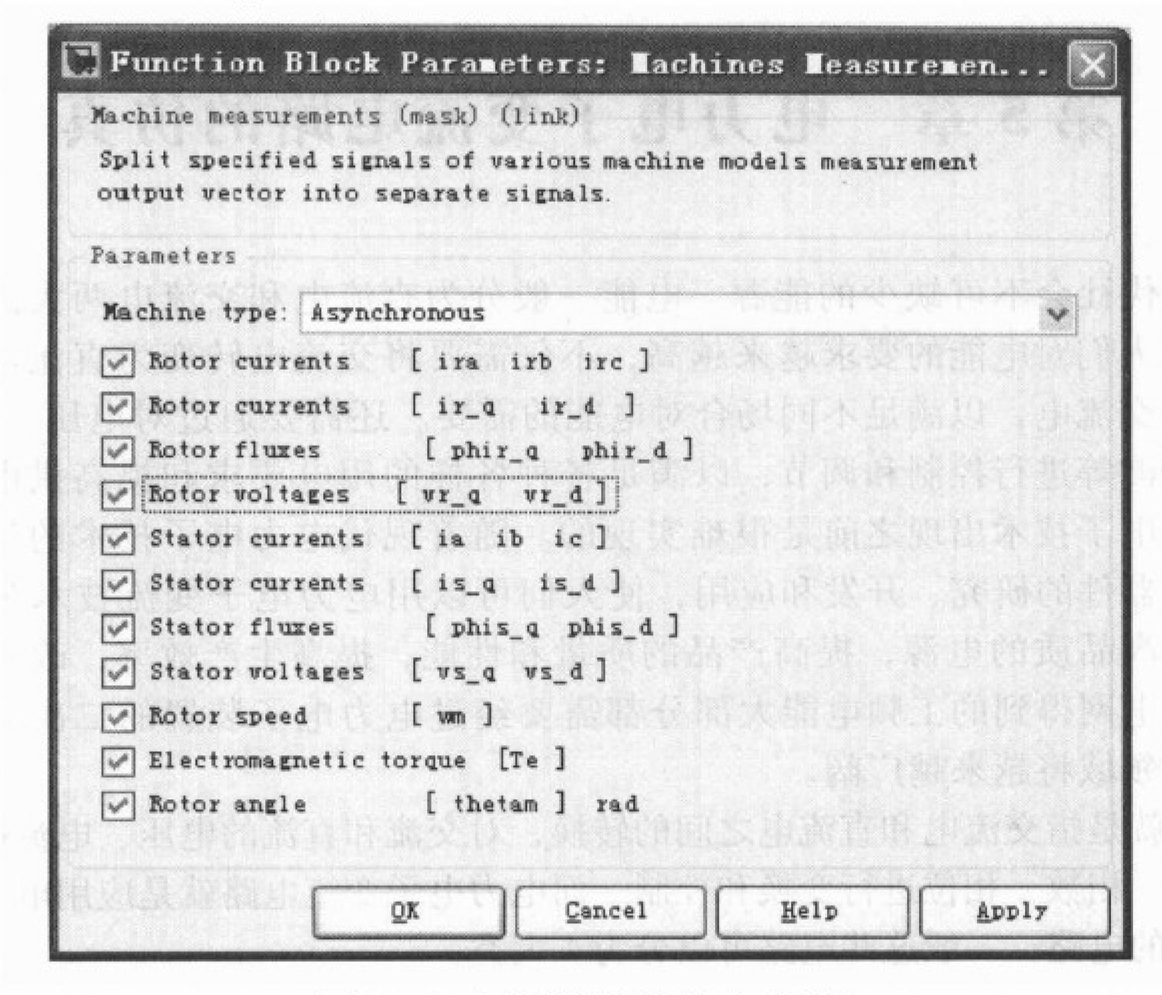


图 4-32　交流电机测量单元对话框

项变量前的空白格，则完成了需观测量的选择。图 4-31b 是选择异步电机后的测量单元图标。观测变量一般可以使用示波器。如果电机模型使用的是标准单位制，则输出变量的单位也是使用标准单位，如果电机模型使用的是标幺值单位制，则输出变量使用的也是标幺值。但是对永磁电机的测量端 m 输出，需要用母线选择器 Bus Selector 观测（见图 4-33）。

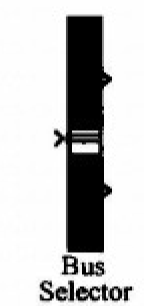


图 4-33　母线选择器

第 5 章　电力电子变流电路的仿真

电能是现代社会不可缺少的能源。电能一般分为直流电和交流电两大类，现代科学技术的发展使人们对电能的要求越来越高，不仅需要将交流电转变为直流电，也需要将直流电转变为交流电，以满足不同场合对电能的需要。还需要通过对电压、电流、频率、功率因数和谐波等进行控制和调节，以满足各种各样的用电要求和提高供电的质量，这些需求在电力电子技术出现之前是很难实现的。随着现代电力电子技术的发展，各种新型电力电子元器件的研究、开发和应用，使人们可以用电力电子变流技术为各种各样的用电要求提供高品质的电源，提高产品的质量和性能，提高生产效率，改善人们的生活环境。将来从电网得到的工频电能大部分都需要经过电力电子装置的二次变换处理，电力电子的应用领域将越来越广阔。

所谓变流就是指交流电和直流电之间的转换，对交流和直流的电压、电流进行调节，对交流电的频率、相数、相位进行变换和控制。而电力电子变流电路就是应用电力电子元器件实现这些转换的电路，一般这些电路可以分为 4 大类：

1）交流/直流（AC/DC）变换；

2）直流/直流（DC/DC）斩波调压；

3）直流/交流（DC/AC）变换；

4）交流/交流（AC/AC）变换，又分为交流调压和交-交变频。

运用现代仿真技术是学习、研究和设计电力电子变流电路的高效便捷的方法。

5.1　交流-直流变换器

交流/直流变换器又称整流器、AC/DC 变流器，其作用是将交流电转变为直流电，一般也称整流，并且在整流的同时还对直流电压、电流进行调节，以满足用电设备的要求。常用的整流器有单相整流器和三相整流器，从控制角度区分，有不控、半控和全控整流电路之分，从输出直流的波形来区分，又有半波和全波整流之分。二极管、晶闸管是常用的整流器件，现在采用全控型器件的 PWM 方式整流器也越来越多。整流电路的仿真可以用 SimPower systems 模型库中的二极管和晶闸管等模块来构建，对三相整流电路，模型库中有 6-pulse diode bridge、6-pulse thyristor bridge、universal bridge 等模块可以调用，使用这些模块可以使仿真更方便。复杂的大功率多相整流器可以在三相桥的基础上构建，这里主要介绍常用的单相和三相的相控整流电路的仿真，同时介绍电力电子系统的仿真方法。

5.1.1　单相桥式全控整流电路仿真

单相桥式全控整流电路如图 5-1 所示，电路由交流电源 u_1、整流变压器 T、晶闸管 VT 1 ~4、负载 R 以及触发电路组成。在变压器二次电压 u_2 的正半周触发晶闸管 VT1 和 VT3，

在u_2的负半周触发晶闸管VT2和VT4，由于晶闸管的单向可控导电性能，在负载上可以得到方向不变的直流电，改变晶闸管的控制角，可以调节输出直流电压和电流的大小。晶闸管触发电路输出脉冲与电源同步是电路正常工作的重要条件。MATLAB/SIMULINK模型库中没有单相晶闸管桥的模块，仿真该电路有两种方法：①用4个晶闸管模块连接成单相桥式电路；②使用universal bridge模块。电路的仿真分为建立仿真模型（或称为绘制仿真电路），设置模型参数和观测仿真结果等几个主要阶段，现分步叙述如下。

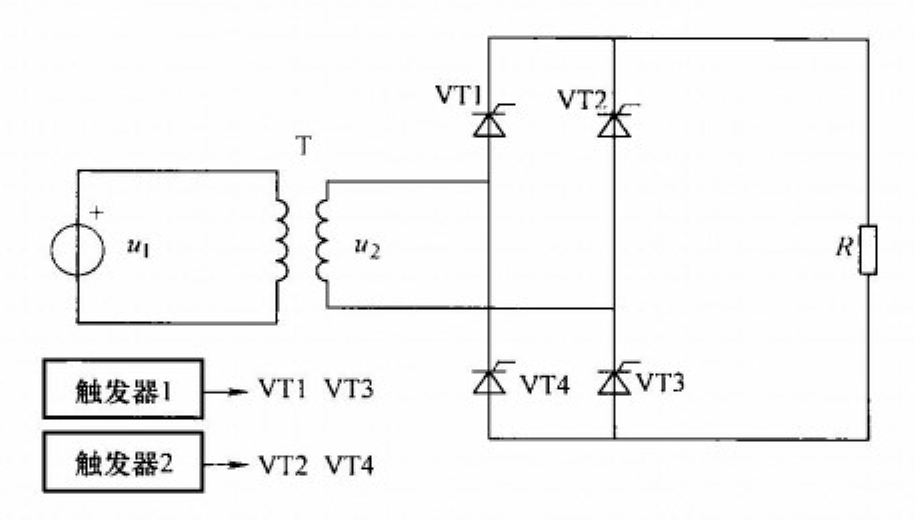


图5-1 单相桥式全控整流原理电路

1. 建立仿真模型

（1）打开SIMULINK仿真平台 在MATLAB的菜单栏上点击File，选择New，在拉出菜单中选择Model，这时出现一个名为untitled的空白仿真平台（见图5-2），在这个平台上可以绘制电路的仿真模型。同时也可以在File菜单下给文件命名。

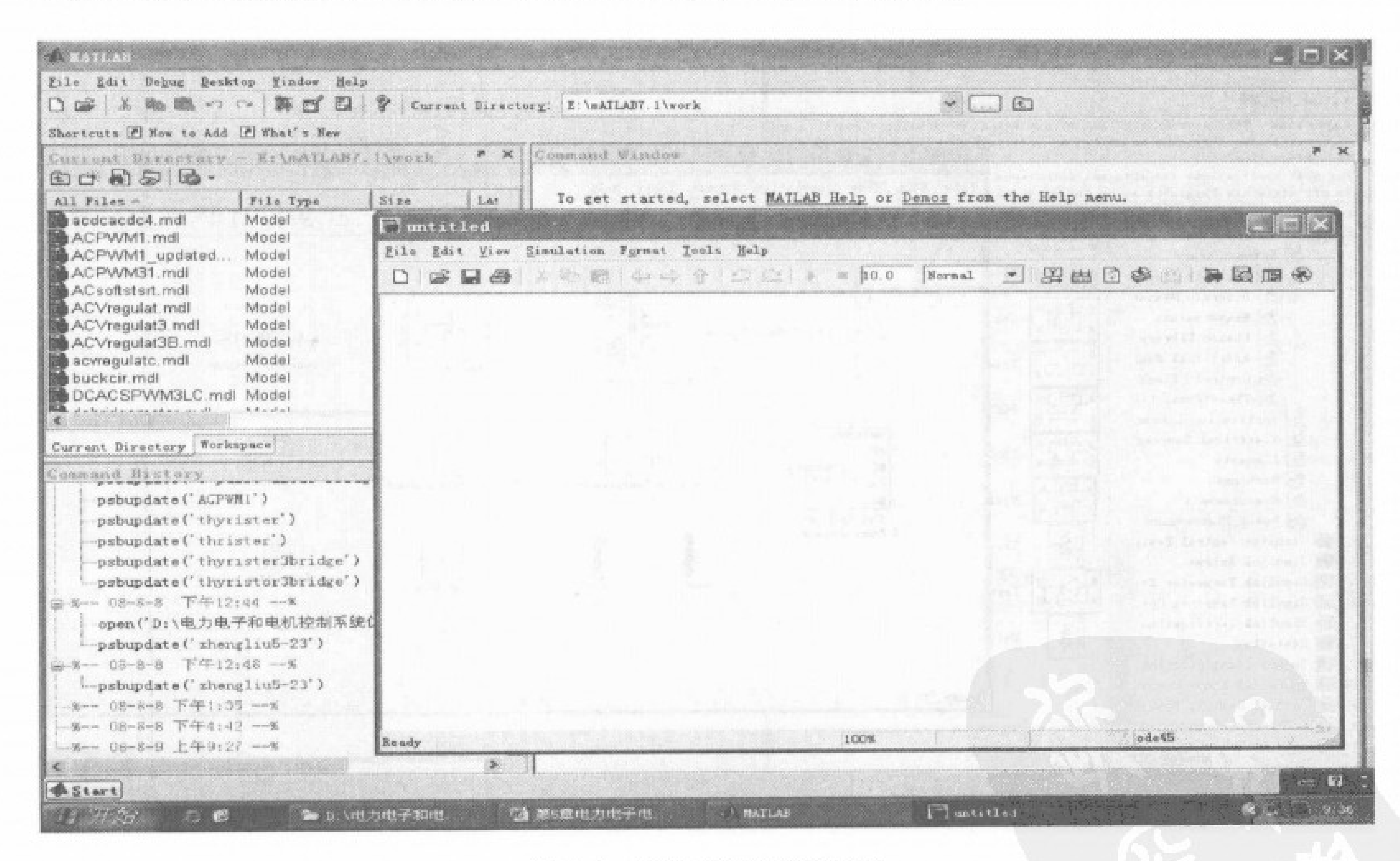


图5-2 SIMULINK仿真平台

（2）提取电路元件模块 在仿真平台窗口的菜单栏上点击图标，调出模型库浏览器Simulink Library Browser（见图5-3左侧），在模型库中逐级打开子模型库，选取适合的模块，将其拖拉到仿真平台上（见图5-3）。组成单相桥式整流电路的主要元器件有交流电源、晶闸管、RLC负载等，提取元器件模块的路径见表5-1。

表 5-1　元器件名称及路径

元器件名称	提取元器件路径
交流电源(AC Voltage Source)	SimPower systems/electrical sources/
单相变压器(Linear Transformer)	SimPower systems/Elements/
晶闸管 VT1 ~ 4(Thyristor)	SimPower systems/power electronics/
RLC 串联电路(Series RLC Branch)	SimPowersystems /elements/
脉冲发生器(Synchronized 6-Pulse Generator)	SimPowersystems /Extra Library/Control Blocks/
电压测量(Voltage Measurment)	SimPowersystems /Measurments/
电流测量(Current Measurment)	SimPowersystems /Measurments
平均值计算模块(Mean Value)	SimPowersystems /Extra Library/ Measurments/
示波器(Scope)	Simulink/Sinks/
常数模块(Constant)	Simulink/Source/
信号综合(Demux) 信号分解(Mux)	Simulink/Singnal Routing/
终端模块(Terminator)	Simulink/Sinks/

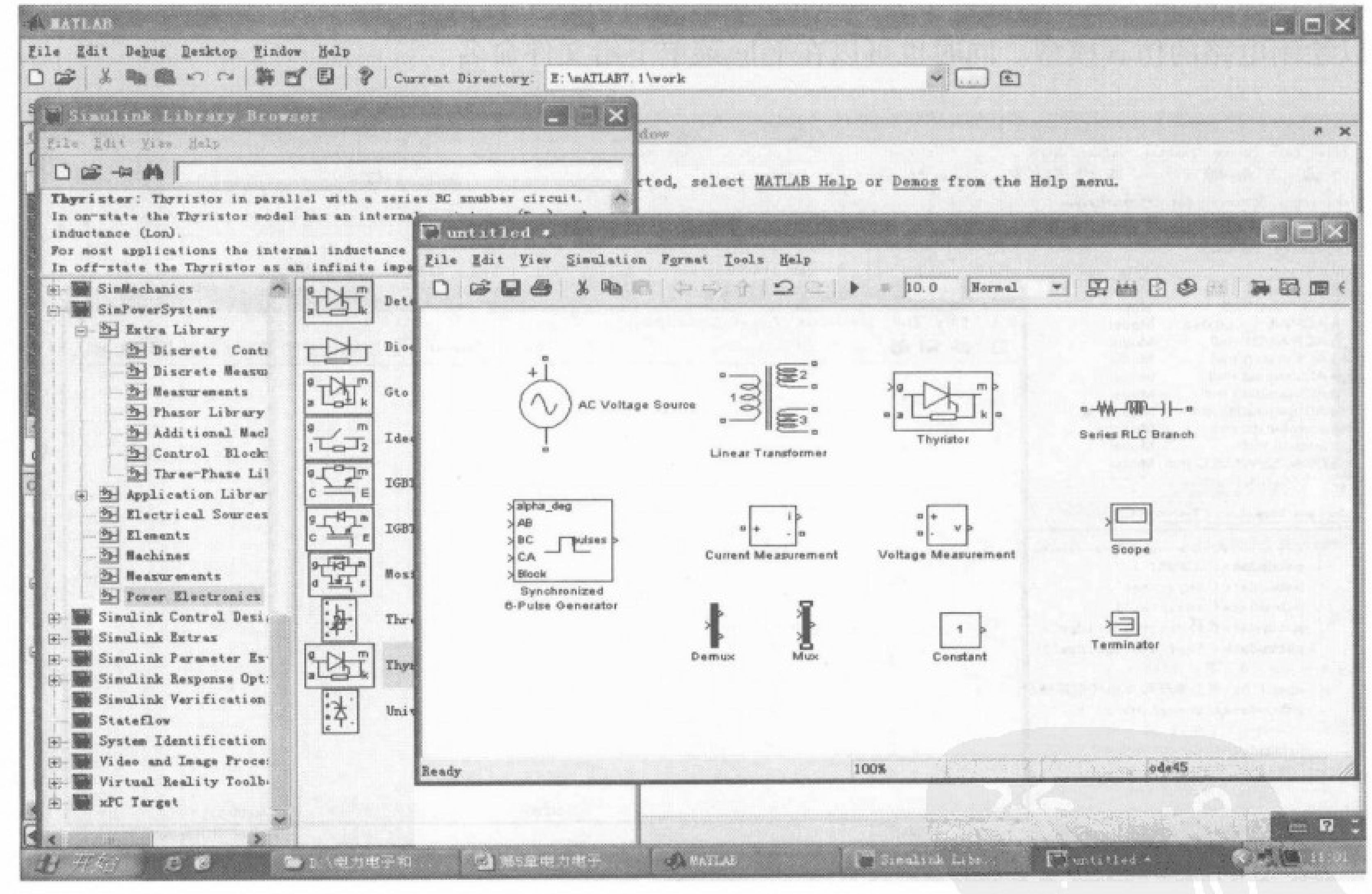


图 5-3　提取仿真模块

（3）将电路元器件模块按单相整流的原理连接起来组成仿真电路　首先将元器件移动到合适的位置，将光标箭头指向需移动的元器件，按住鼠标左键，移动鼠标将元器件拖拉到指定位置。如果需要多个相同模块，例如单相桥需要 4 个晶闸管模块，这可以使用模块的复制方法，以鼠标单击晶闸管模块图标，模块图标的四角出现四个小黑块（■），表明该模块已被选中，这时同时按住键盘 Ctrl 键和鼠标左键，移动鼠标，将模块拖拉到复制位置后松开

鼠标，则可以将晶闸管模块复制到其他位置。若点击元件模块的名称，可以修改模块名，如将 thyristor 改名为 VT 等。

连接模块只需要将光标移向模块的输出端，以左键点住并移动鼠标，即可拖拉出一条连线，将连线拉到另一元件的输入端，松开鼠标即完成一条接线。

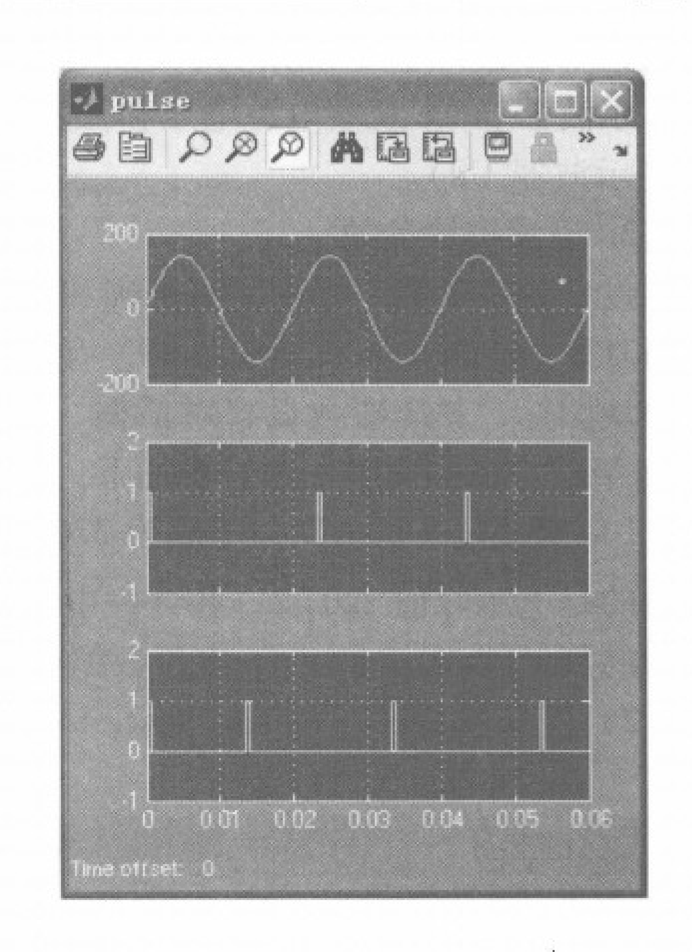


图 5-4　脉冲与电源同步关系

在 SIMULINK 模型库中没有专用的单相桥式整流电路的触发模块，这里使用了三相桥的触发器（Synchronized 6-Pulse Generator）来产生晶闸管 VT1、VT4 和 VT2、VT3 的触发脉冲（见图 5-4）。用电压测量器取得变压器二次电压信号作为触发器的同步信号，同步信号从触发器 AB 端输入，触发器的 BC、CA 端和 Block 端用常数模块置“0”。Synchronized 6-Pulse Generator 产生 6 路触发信号，通过 Demux 分解并与变压器二次电压的相位比较（见图 5-4），图 5-4 上为变压器二次电压波形，中为第 6 路触发脉冲，下为第 4 路触发脉冲，将脉冲相位与正弦波比较，这两路信号可以满足单相桥的触发和移相控制要求，因此将第 6 路触发脉冲连接 VT1 和 VT4 控制极，第 4 路触发脉冲连接 VT2 和 VT3 控制极。

整流器的负载选用了 RLC 串联电路，通过对话框来改变电阻、电感和电容的组合。连接完成的单相桥式整流电路模型如图 5-5 所示。模型中用示波器（Scope）观测连接点上的

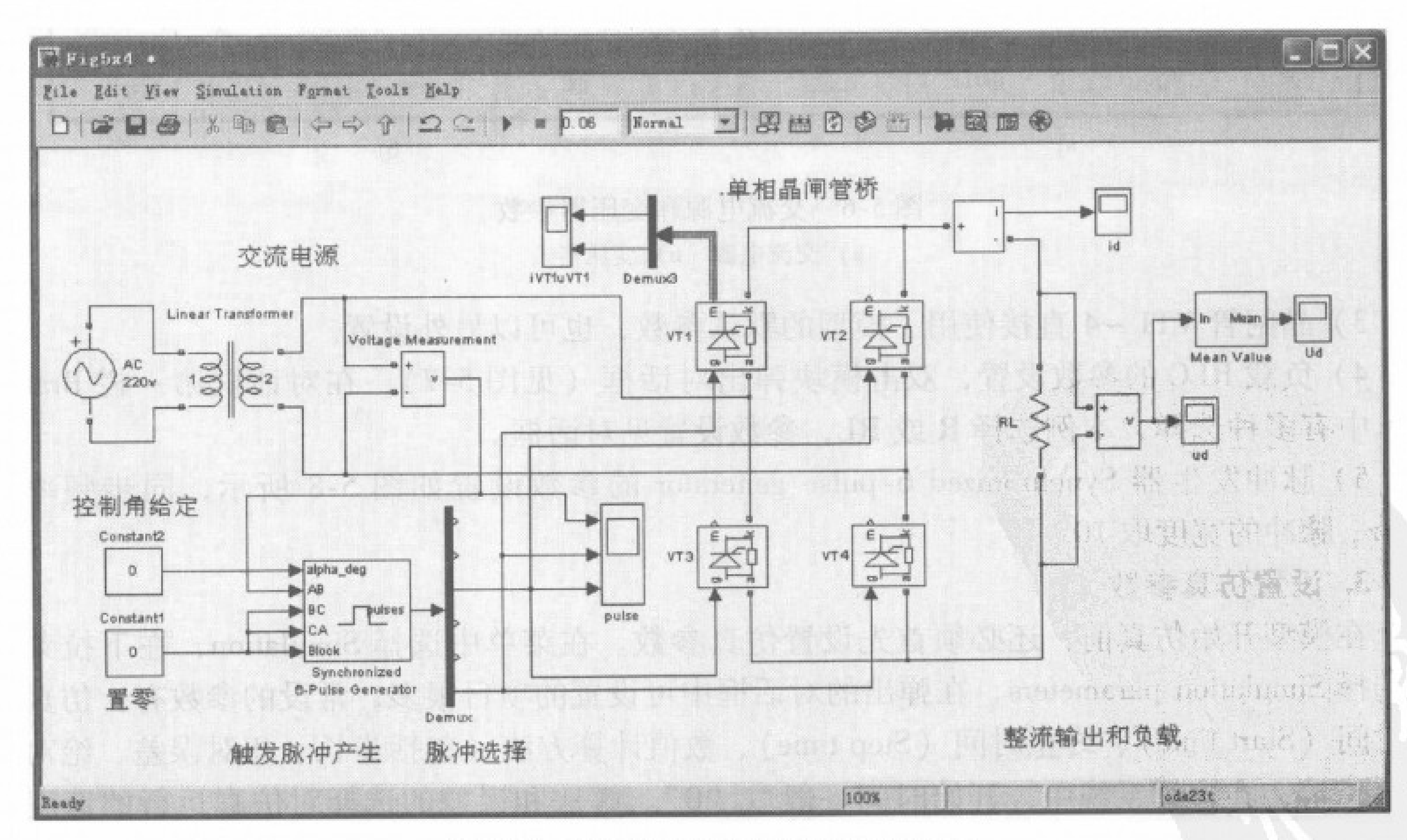


图 5-5　单相桥式晶闸管整流电路模型

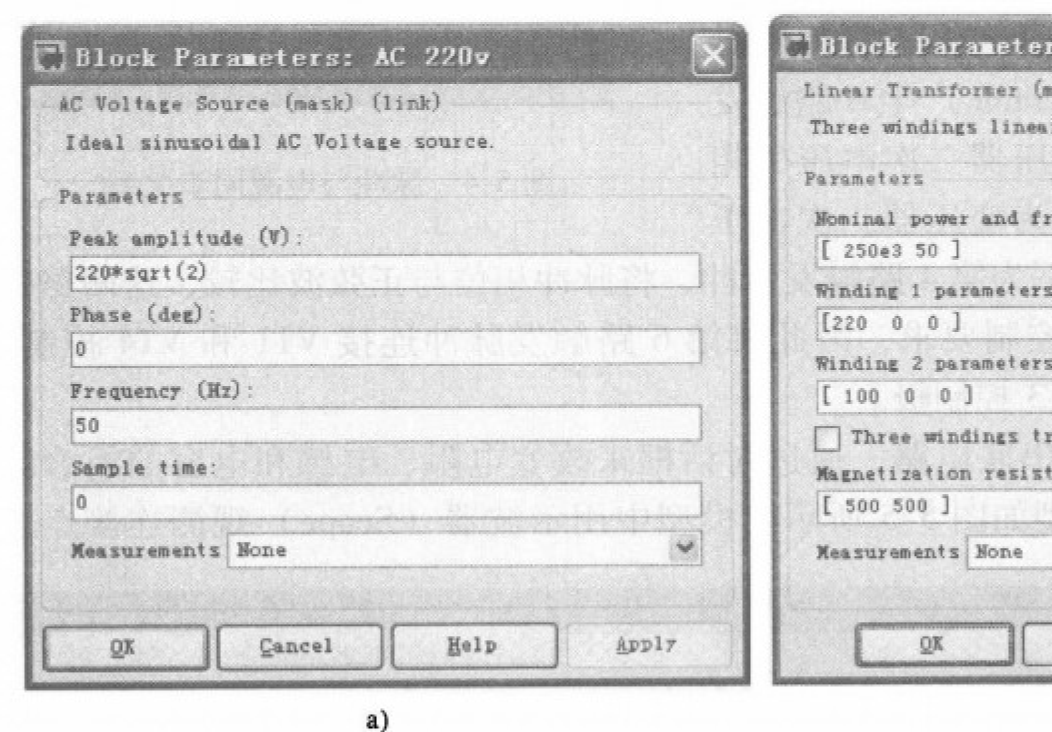
波形，示波器 ud、id 观察负载电压和电流，示波器 uVT1 、iVT1 观察晶闸管 VT1 的电压和电流，示波器 pulse 观察电源电压和触发脉冲，并且通过 Mean Value 计算负载两端的电压平均值（示波器 Ud）。

2. 设置模块参数

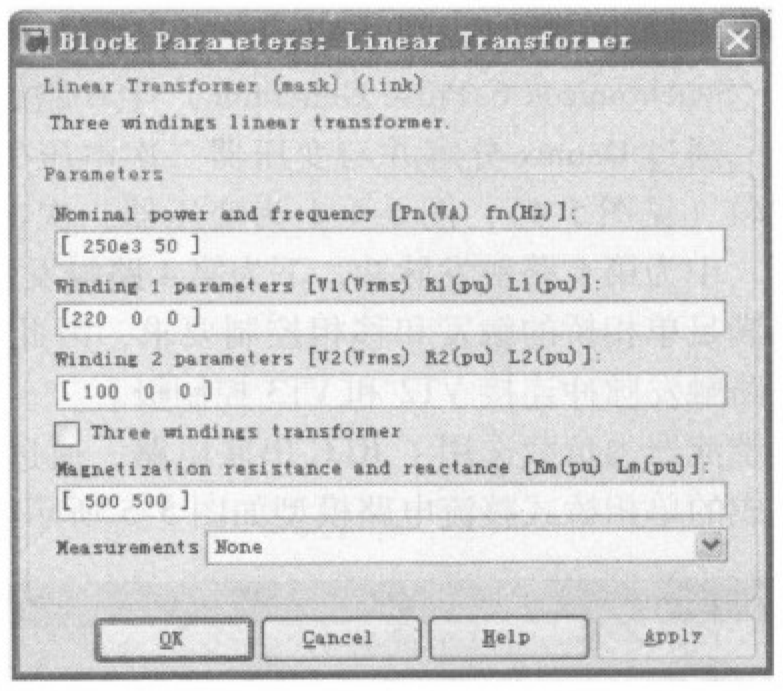
设置模块参数是保证仿真准确和顺利的重要一步，有些参数是由仿真任务规定的，如本例仿真中的电源电压、电阻值等，有些参数是需要通过仿真来确定的。设置模块参数可以双击模块图标，弹出参数设置对话框，然后按框中提示输入，若有不清楚的地方，可以借助 Help 帮助。在本例中参数设置如下：

1）交流电压源 AC，电压为 220V，频率为 50Hz，初始相位为 0°。在电压设置中要求输入的是电压峰值 $220\sqrt{2}$，在该栏中键入 220 * sqrt（2），如图 5-6a 所示。若选择了对话框最后的测量项 Measurment，电压数据可以通过多路测量仪 multimeter 观察。

2）变压器参数如图 5-6b 所示，一次电压为 220V（有效值），二次电压为 100V（有效值）。



a)



b)

图 5-6 交流电源和变压器参数

a）交流电源 b）变压器

3）晶闸管 VT1 ~4 直接使用了模型的默认参数，也可以另外设置。

4）负载 RLC 的参数设置，双击模块弹出对话框（见图 5-7），在对话框第一栏 Brabch type 中有多种选择，本例选择 R 或 RL，参数设置见对话框。

5）脉冲发生器 Synchronized 6-pulse generator 的参数设置如图 5-8 所示，同步频率为 50Hz，脉冲的宽度取 10°。

3. 设置仿真参数

在模型开始仿真前，还必须首先设置仿真参数。在菜单中选择 Simulation，在下拉菜单中选择 Simulation parameters，在弹出的对话框中可设置的项目很多，常设的参数有：仿真开始时间（Start time）、终止时间（Stop time）、数值计算方法（包括步长、相对误差、绝对误差等）等，在连续系统中，开始时间一般取“0”。解法和误差的选择对仿真运行的速度影响很大，步长太大，计算容易发散，步长太小，运算时间太长，电力电子系统仿真一般选可

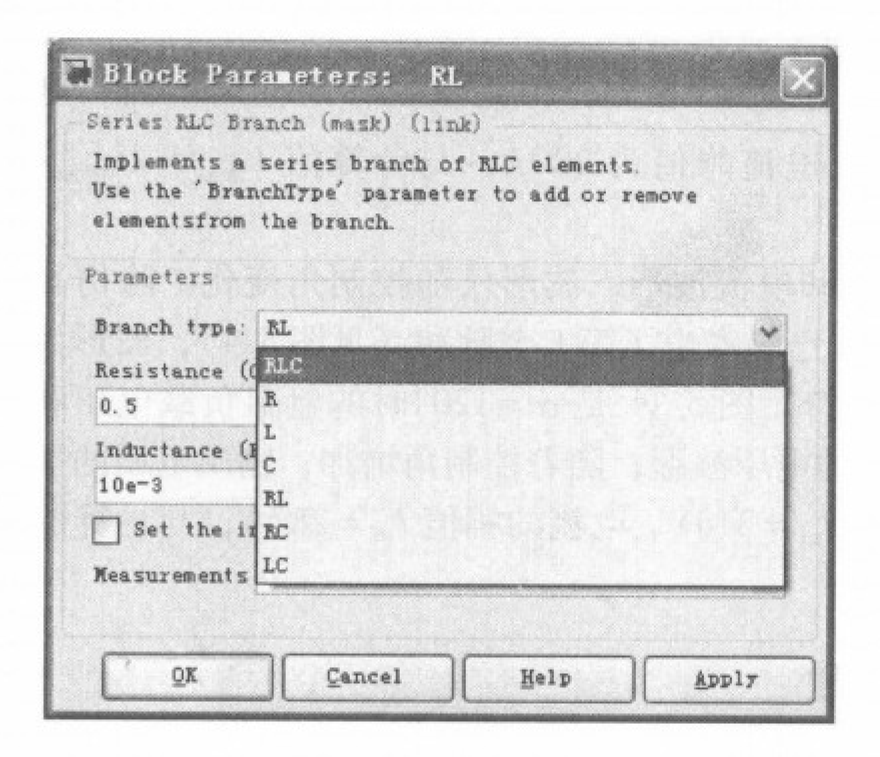


图 5-7　负载 RLC 对话框

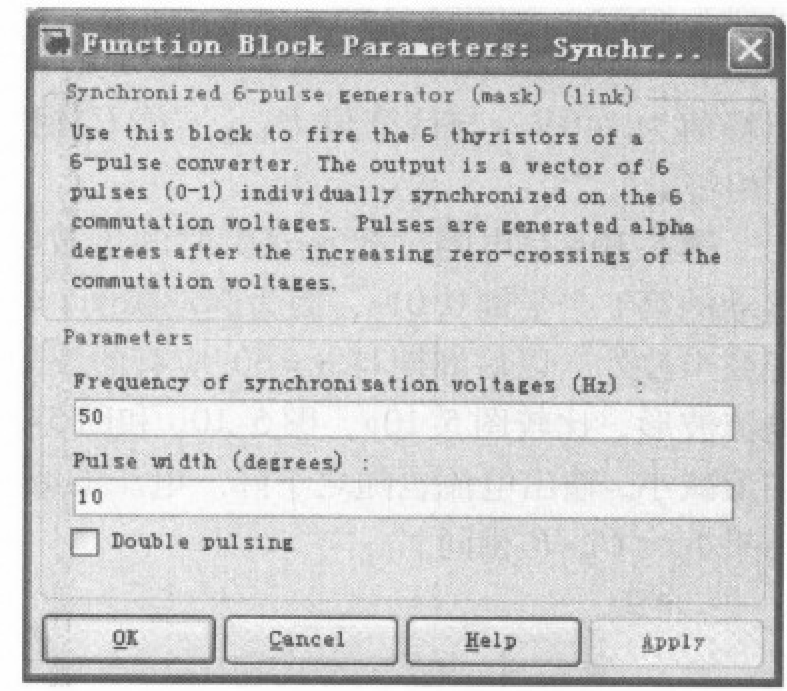


图 5-8　Synchronized 6-pulse generator 对话框

变步长 variable-step，仿真数值计算方法可选 ode15、ode23、ode45 等，误差选择 0.001 对电力电子电路的仿真精度足够了。本例的仿真参数设置如图 5-9 所示。

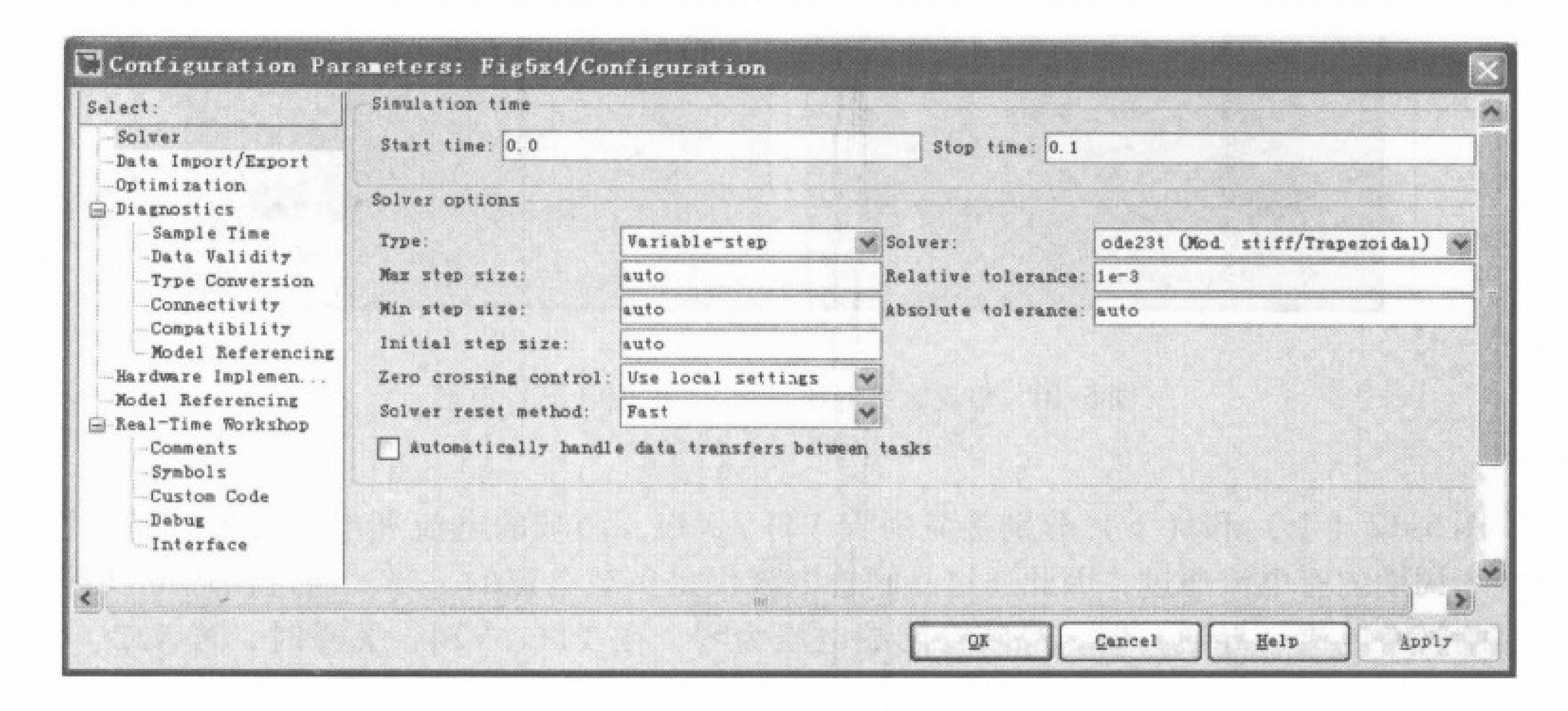


图 5-9　仿真参数设置对话框

4. 启动仿真

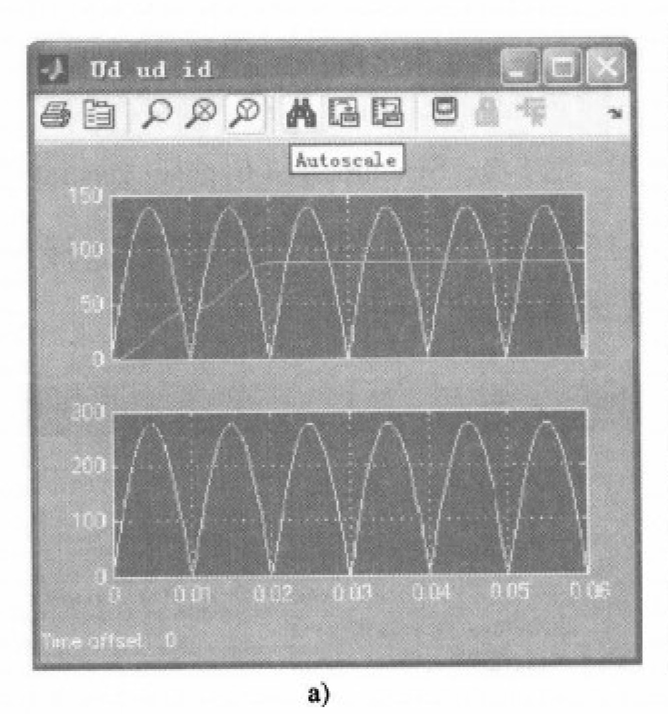
在参数设置完毕后即可开始仿真。在菜单 Simulation 栏下选择"Start"，或直接点击工具栏上的"▶"按钮，仿真立即开始，在屏幕下方的状态栏上可以看到仿真的进程。若要途中停止仿真，可以选择"Stop"或点击工具栏上的"■"按钮。

在仿真计算完成后，即可以通过示波器来观察仿真的结果。我们已经在需要观测的点上连接了示波器，双击示波器图标，即弹出示波器窗口显示波形，并可以用放大镜作仔细观察和分析。

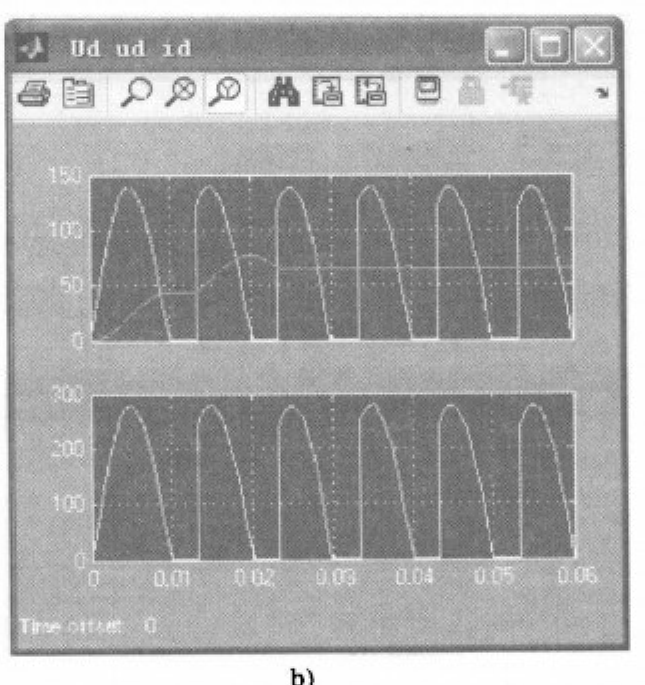
（1）电阻性负载仿真分析　图 5-10a 是 0～0.06s 电阻负载 $\alpha=0°$时的负载电压和电流波形，其中电压波形中有瞬时值和计算的平均值，波形表明，电压和电流都是脉动的

直流，反映了电源的交流电经过整流器后成为了直流电，实现了整流。波形呈周期性正弦半波，因为是电阻负载，整流后的电压和电流形状相同，但是纵坐标的标尺不同，电压峰值为 140V，与计算值 $U_{dmax}=\sqrt{2}U_2$ 相符，电流峰值为 280A，与计算值 $I_{dmax}=U_{dmax}/R$ 相符。

图 5-10b 是电阻负载 $\alpha=60°$ 时的负载电压和电流波形，波形已随控制角变化，除仿真起动的第 1 个半周 0.01s，因为起动瞬间 $t=0$ 时已经产生了第 1 个脉冲（见图 5-4），波形为正弦半波外，以后周期与 $\alpha=60°$ 应有的波形相符。图 5-11 是 $\alpha=120°$ 时的电阻负载电压和电流波形，比较图 5-10a、图 5-10b 和图 5-11 的电压波形，随着控制角增加，输出电压的平均值减小，输出电流也随之下降。电压的幅值 $U_m=310V$，电流的幅值 $I_m=280A$，与计算的结果 $I_m=U_m/R$ 相同。



a)



b)

图 5-10 整流输出电压（上）、电流（下）波形

a) $\alpha=0°$ b) $\alpha=60°$

图 5-12（上）和（下）分别是晶闸管 VT1、VT4、两端的电流和电压波形，晶闸管只在半个周期内有电流通过，因此通过晶闸管电流仅是负载电流的一半。通过比较可以看到，在晶闸管有电流（导通）时，晶闸管两端电压为零，在 VT1、VT4、关断时，若 VT2、VT3 也关断，则 VT1、VT4、承受 $u_2/2$ 电压，若 VT2、VT3 导通，则 VT1、VT4、承受电源电压 u_2，且承受的最高反向电压为电源电压的峰值 $U_{2max}=\sqrt{2}U_2$，根据该电压和电流可以选择晶闸管的额定参数。

（2）电阻-电感（RL）负载仿真分析　如果要研究电感性负载时整流器的工作情况，只需在对话框（见图 5-7）中选择类型为 RL，再次启动仿真，得到如图 5-13 和图 5-14 所示的波形。如果电感较大，整流器输出电压电流波形连续，$\alpha>0°$后电压波形出现负值，比较图 5-13 和图 5-14 可知，电压的负值随控制角的增加而增加，整流输出电压平均值（图中水平线）则随控制角增加而减小，同时负载电流下降，从 $\alpha=30°$时的 700A 减小到 $\alpha=60°$时的 400A，电流的脉动变大。电感负载在起动时电流有上升过程（见图 5-13b），在数个周期后才进入稳态，这是感性负载的特点。读者可以修改电源、变压器和负载的参数，研究和观察整流电路的不同工况，为整流器设计最佳参数。

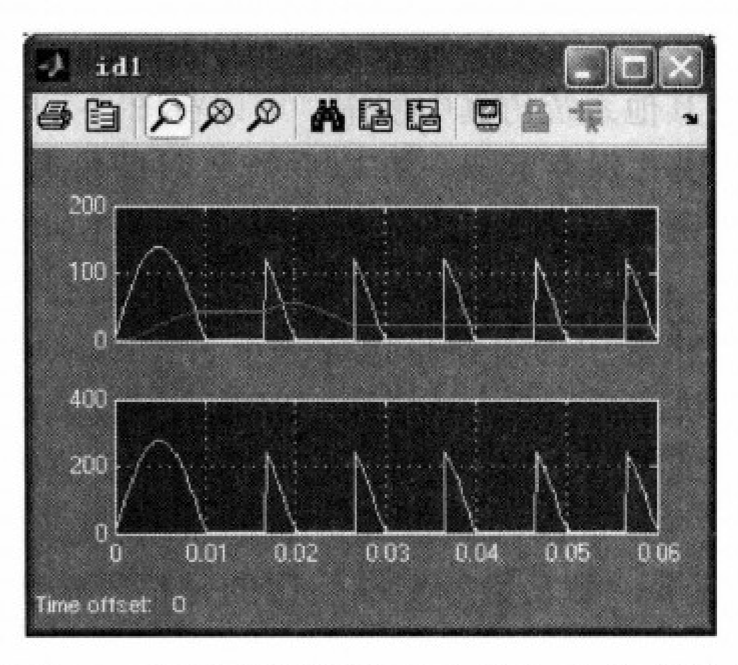


图 5-11　$\alpha=120°$时整流器输出电压（上）、电流（下）波形

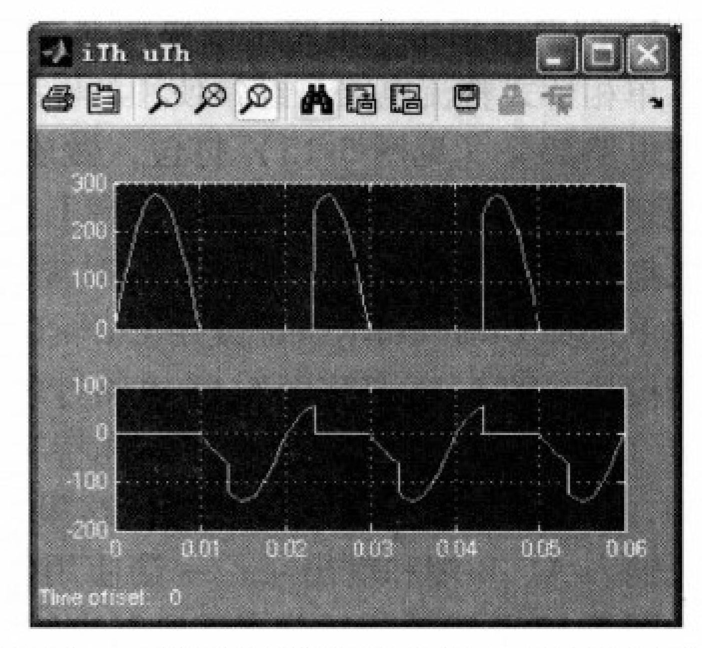
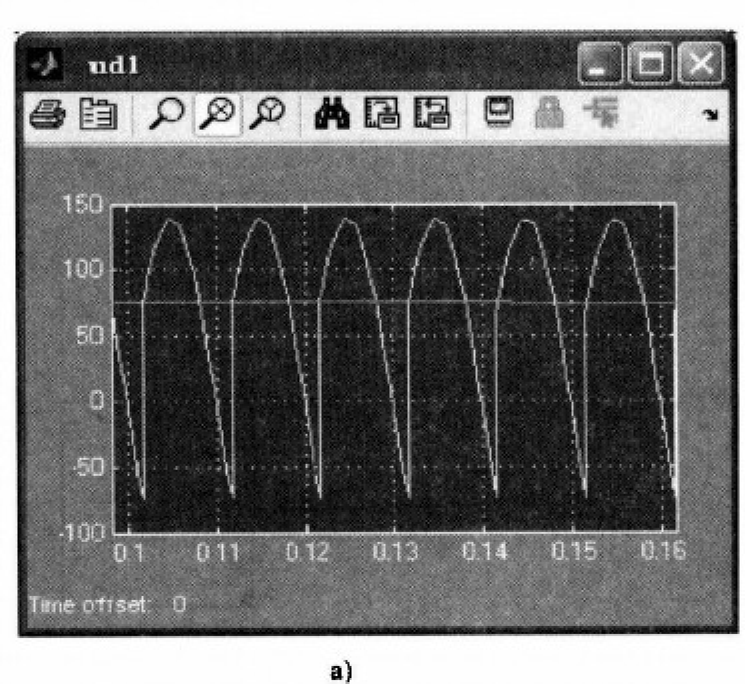
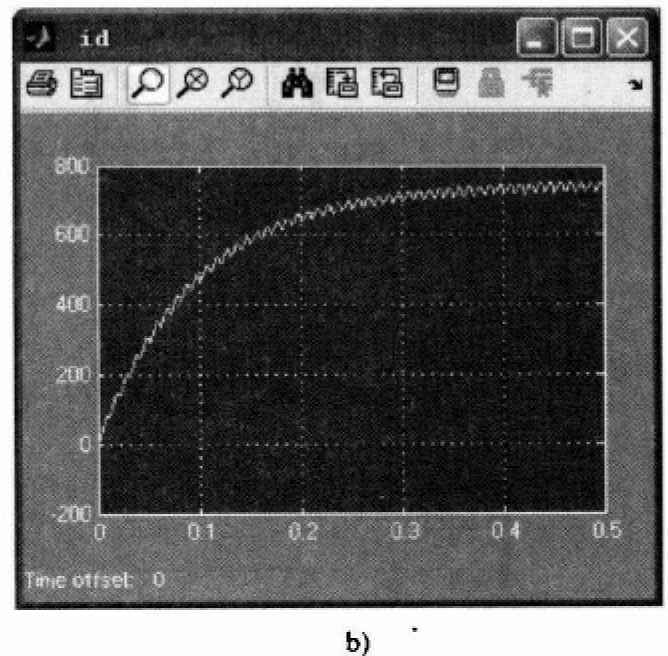


图 5-12　$\alpha=60°$时晶闸管电流（上）、电压（下）波形



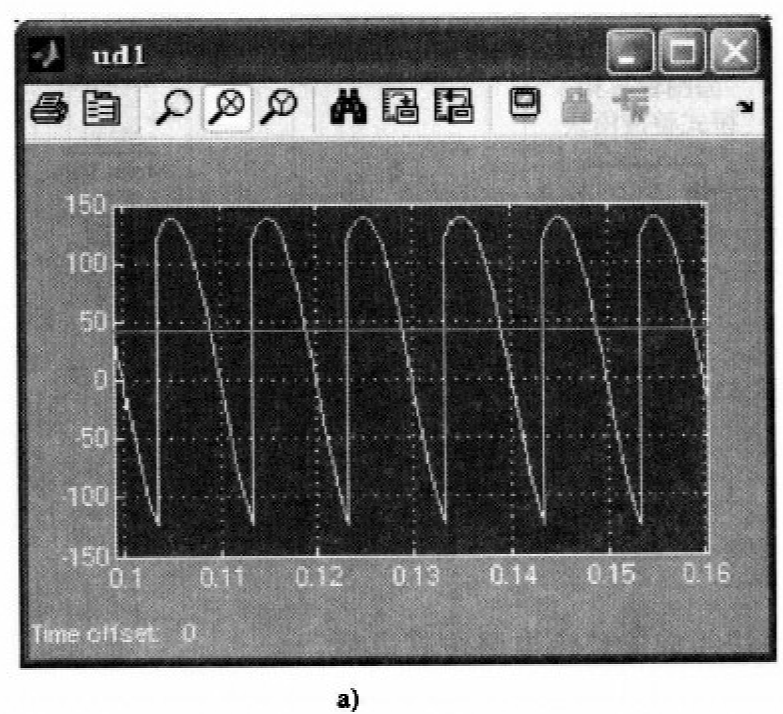
a)



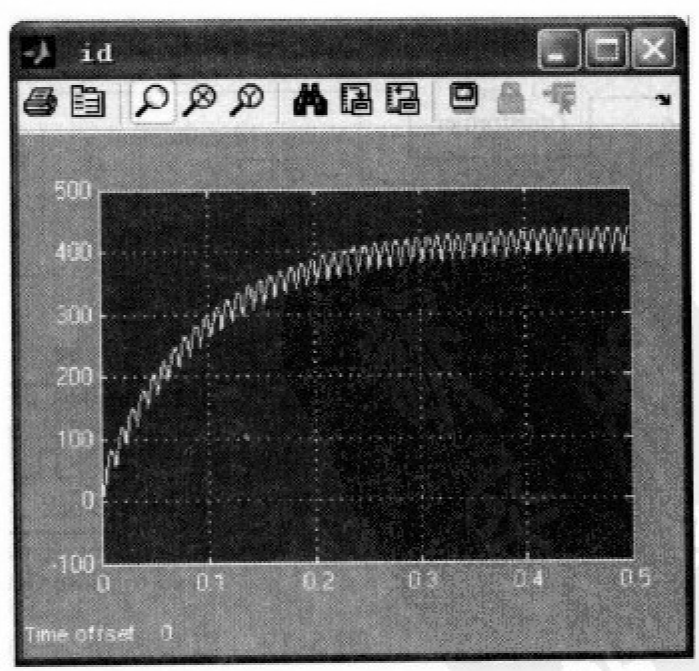
b)

图 5-13　$\alpha=30°$时 RL 负载电压电流波形

a）电压瞬时值和平均值　b）电流



a)



b)

图 5-14　$\alpha=60°$时 RL 负载电压电流波形

a）电压瞬时值和平均值　b）电流

5. 创建单相桥式电路子模块

单相桥式整流电路是经常使用的电路，为了在其他系统仿真中使用，可以将图 5-5 中的整流电路部分（见图 5-15）打包，做成一个新模块并保存起来，在以后需要时即可调用。打包建立新模块的方法是在仿真平台上点住鼠标左键拖拉光标，将需要打包的元器件和电路纳入拖拉出现的虚框内，松开鼠标时虚框内的所有元器件和接线都会被选中，然后在 Edit 菜单下选择 Great Subsystem 或用 Ctrl + G 键，即可将选中的电路打包成一个名为 Subsystem 的新模块。图 5-16 是将图 5-15 电路打包形成的模块图标，双击该模块可以看到组成模块的内容（见图 5-15），模块包含了单相桥和触发脉冲的分配电路，模块的 A、B 端是交流侧接线端，+、－端是直流侧接线端，这里需要注意，在 SimPowersystems /Elements 模块库中，模块输入 A、B 端和输出 +、－端使用的是电路端子，触发信号 g 端使用的是信号输出端子。图 5-17 是用单相桥分支模块组成的整流电路仿真模型，运行该模型，可以得到与前一致的结果。

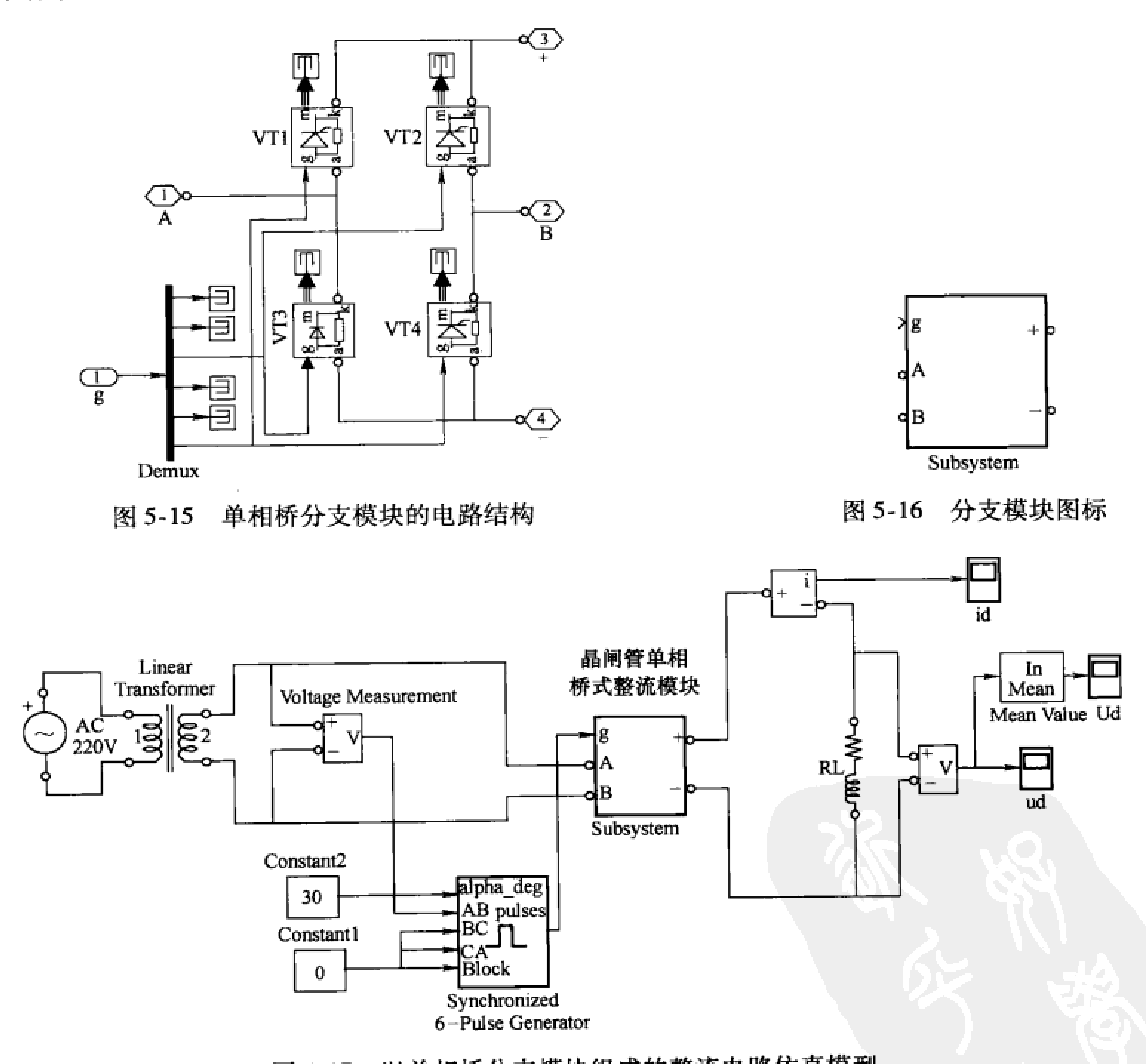


图 5-15　单相桥分支模块的电路结构

图 5-16　分支模块图标

图 5-17　以单相桥分支模块组成的整流电路仿真模型

6. 用 Universal Bridge 仿真单相桥式整流电路

图 5-5 所示单相晶闸管整流电路中 4 个晶闸管可以直接调用桥式电路通用模块

(Universal Bridge)(见图 5-18),设置 Universal Bridge 的相数为"2",开关器件为 thyristor。触发电路仍用 Synchronized 6-Pulse Generator,因为 Universal Bridge 对控制极触发信号的要求,Synchronized 6-Pulse Generator 产生的脉冲需要用 Demux 和 Mux 重新组合,如图 5-18 所示。

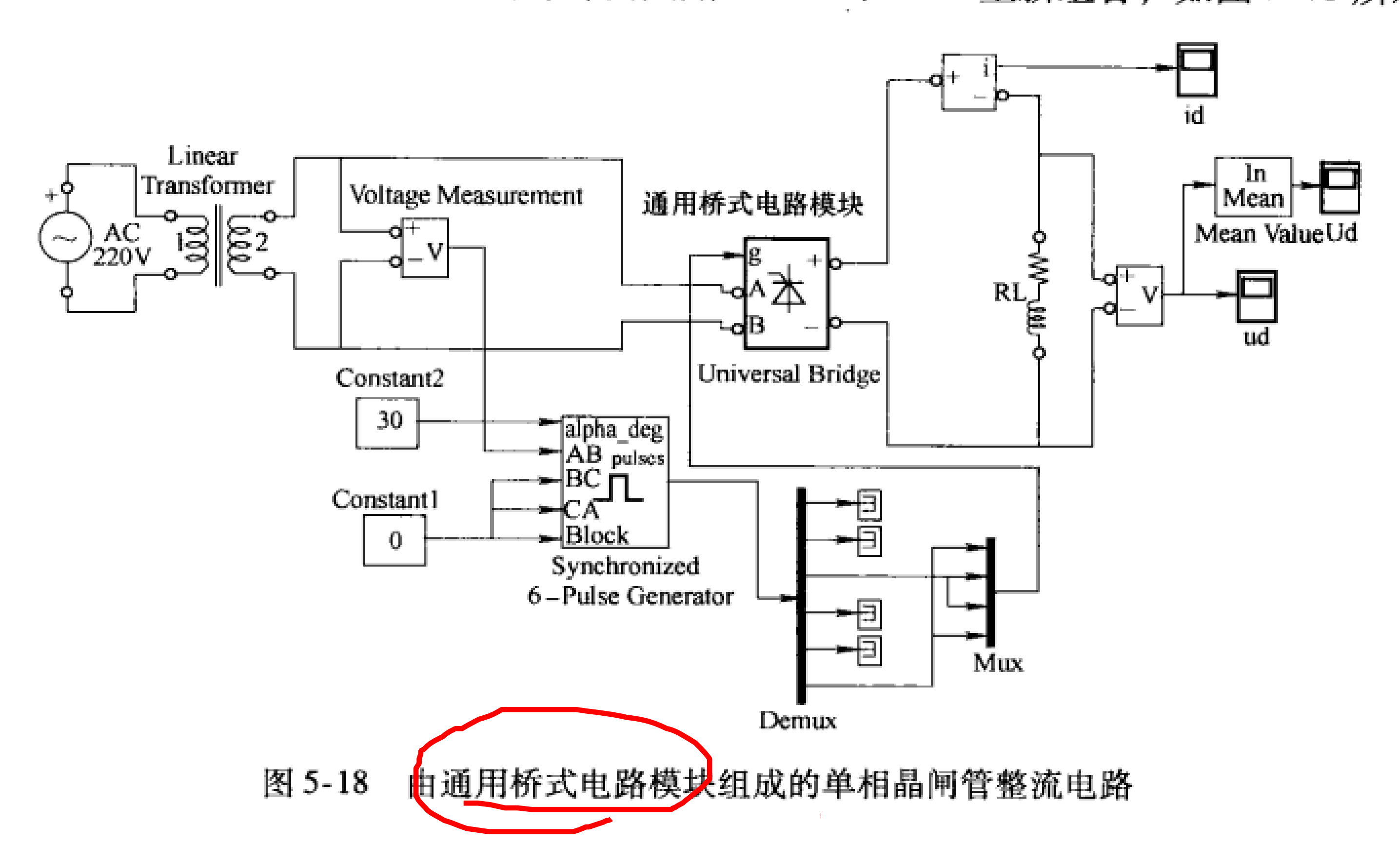


图 5-18　由通用桥式电路模块组成的单相晶闸管整流电路

5.1.2　三相桥式全控整流电路仿真

三相桥式全控整流电路是应用最广泛的整流电路,完整的三相桥式全控整流电路由整流变压器、6 个桥式连接的晶闸管、负载、触发器和同步环节组成(见图 5-19)。6 个晶闸管依次相隔 60°触发,将电源交流电整流为直流电。三相桥式整流电路必须采用双脉冲触发或宽脉冲触发方式,以保证在每一瞬时都有两个晶闸管同时导通(上桥臂和下桥臂各一个),整流变压器采用三角形/星形联结。

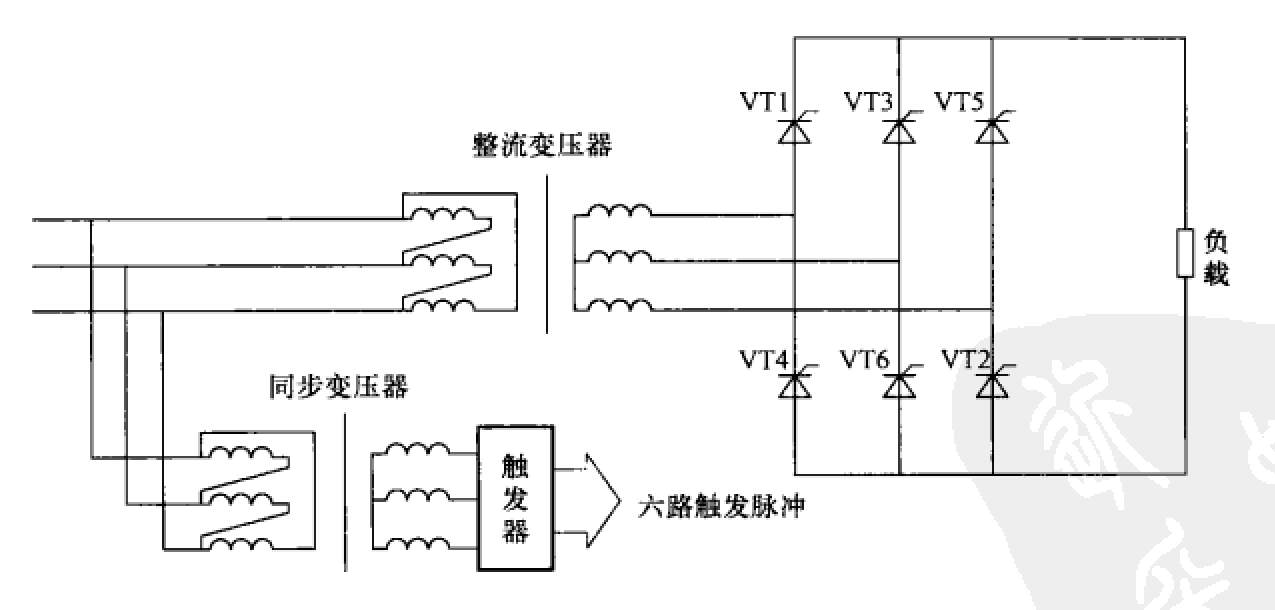


图 5-19　三相桥式全控整流原理电路

三相桥式整流电路的仿真使用 SimPowersystems 模型库中的三相桥和触发器的集成模块,用它们组成的三相桥式整流电路的仿真模型如图 5-20 所示。在有的模型库中 6-pulse thyristor bridge 模块仍使用信号端口,这时需要用 psbupdate 函数转换为电路端口,6-pulse thyristor

bridge 模型没有测量端，需要时可打开其子电路，引出晶闸管的测量端口（见图 3-23b），模型中用多路测量仪 Multimeter 观察变压器和负载的电压电流波形，并且用 RMS 模块计算整流变压器二次电压的有效值，用 Mean Value 模块计算整流器输出电压和电流的平均值，用 powergui 模块进行谐波分析。

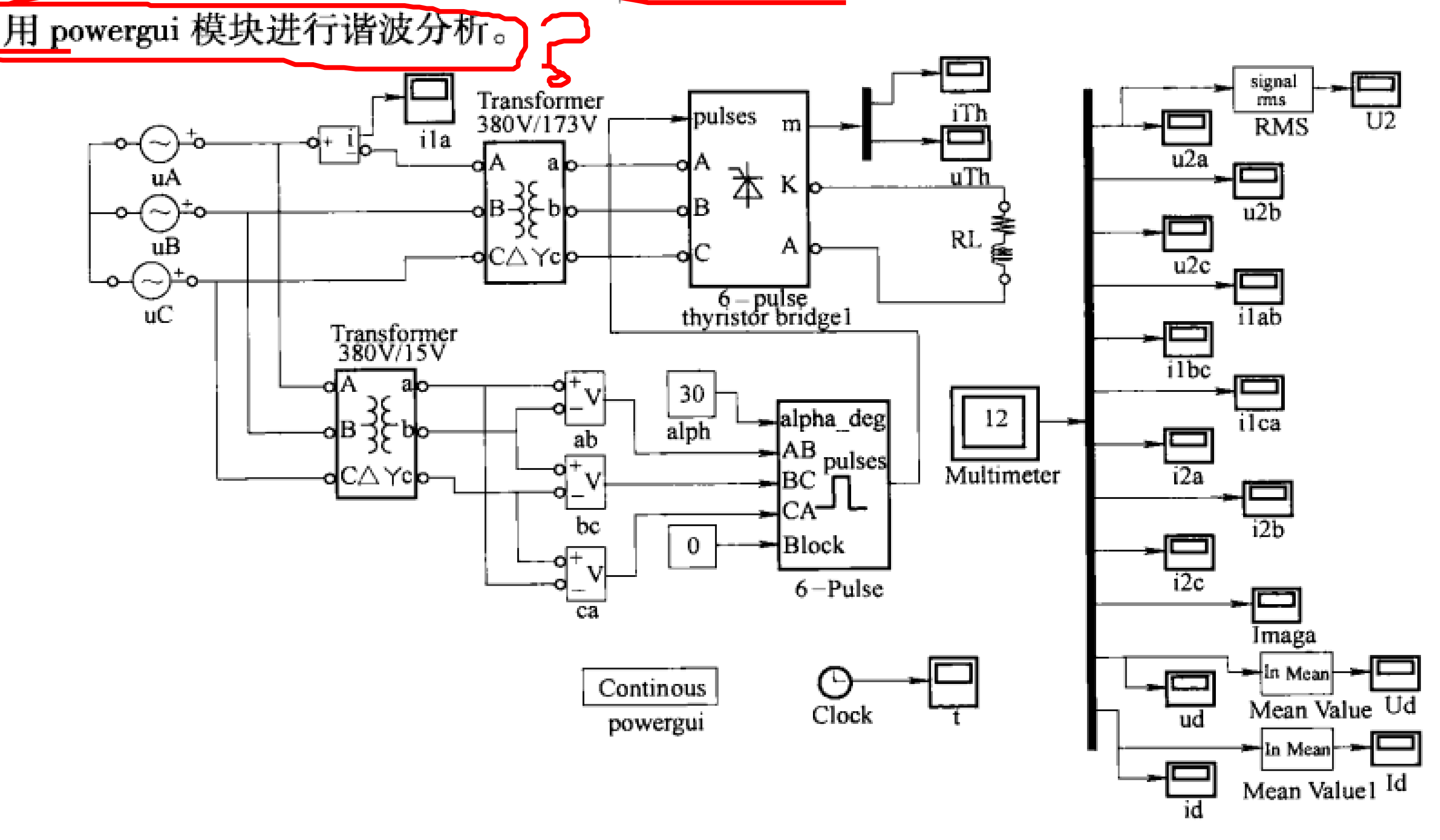


图 5-20　三相桥式整流电路仿真模型

仿真模型中主要使用的元器件模块和提取路径见表 5-2，整流器工作中保证触发脉冲与主电路同步很重要，仿真使用的六脉冲发生器是在同步电压过零时作为控制角 $\alpha=0°$ 的位置，因此在整流变压器采用△/Y-11 联结时，同步变压器也可以采用△/Y-11 联结，同步信号的连接如图 5-20 所示。在同步信号关系难于确定时，可以利用仿真的优点，将三相同步电压信号以不同的顺序连接到六脉冲发生器的 AB、BC、CA 三个同步输入端，然后运行该模型，观察整流器输出电压波形，如果电压波形在一周期中 6 个波头连续规则，则该整流器的同步是正确的。负载和控制角可以按需要设定。

表 5-2　三相整流电路模型主要元器件

元器件名称	提取路径 SimPowersystems/
交流电源 u_A、u_B、u_C	Electrical sources/AC voltage source
整流变压器(Transformer)	Element/Three-phase transformer(two windings)
同步变压器(T-Transformer)	同上
三相晶闸管整流器(6-pulse thyristor bridge)	(Extra library/three-phase libary/6-pulse thyristor bridge)
RL 负载	Elements/series RLC branch
六脉冲发生器(6-pulse)	Extra library/control blocks/synchronized 6-pulse generator
控制角设定(alph)	Simulink/sources/constant
平均值计算(Mean Value)	Extra library/Measurements/Mean Value
有效值计算(RMS)	Extra library/Measurements/RMS
多路测量器(Multimeter)	Measurements/Multimeter
模型分析仪(powergui)	SimPowersystems/

【例 5-1】　三相桥式全控整流电路，电源相电压为 220V，整流变压器输出电压为 100V（相电压），观察整流器在不同负载、不同控制角时整流器输出电压、电流波形，测量其平

均值，并观察整流器电流波形和分析其主要谐波。

电阻负载

（1）模型参数

1）三相电源 u_A、u_B、u_C：电压峰值为 $220\sqrt{2}$，可表示为220 * sqrt（2），频率为50Hz，相位分别为0°、-120°、-240°。

2）整流变压器：一次绕组联结（winding 1 connection）选择 Delta（D11），线电压 $U_1 = 220\sqrt{3}V = 380V$；二次绕组联结（winding 2 connection）选择Y，线电压 $U_2 = 100\sqrt{3}V = 173V$，在要求不高时，变压器容量、互感等其他参数可以保持默认值不变。

3）同步变压器：一次绕组联结（winding 1 connection）选择 Delta（D11），线电压 $U_1 = 380V$；二次绕组联结（winding 2 connection）选择Y，线电压 $U_2 = 10V$，其他参数保持默认值。

4）三相晶闸管整流器参数使用默认值。

5）RLC 负载：$R = 5\Omega$。

6）6-脉冲发生器：频率50Hz，脉冲宽度取10°，选择双脉冲触发方式。

7）控制角给定（alph）：设置为0°、30°、60°等。

（2）仿真参数　仿真时间可以按需要设置是任意的，时间长观察到的波形多，计算花费的时间也多。一般电阻负载2个电源周期后电路已进入稳态，电感负载因为电流有上升时间，仿真时间也需要长一些，本例设为0.6s。仿真算法采用ode23tb。

（3）仿真结果分析

1）电阻负载时仿真结果如图5-21所示，图中波形用 plot 命令画出，其中图5-21a、b、c 中细实线为输出电压瞬时值，粗实线为输出电压平均值，比较图5-21a～c 可知，随着控制角增加，整流器输出电压减小。输出电压瞬时值波形与电源线电压波形（虚线）不完全重合，峰值比电源线电压较低，这是晶闸管导通电阻造成的电压降。图5-21d 为晶闸管两端的电压波形，晶闸管导通时电压为零，晶闸管关断时，晶闸管承受电源线电压。

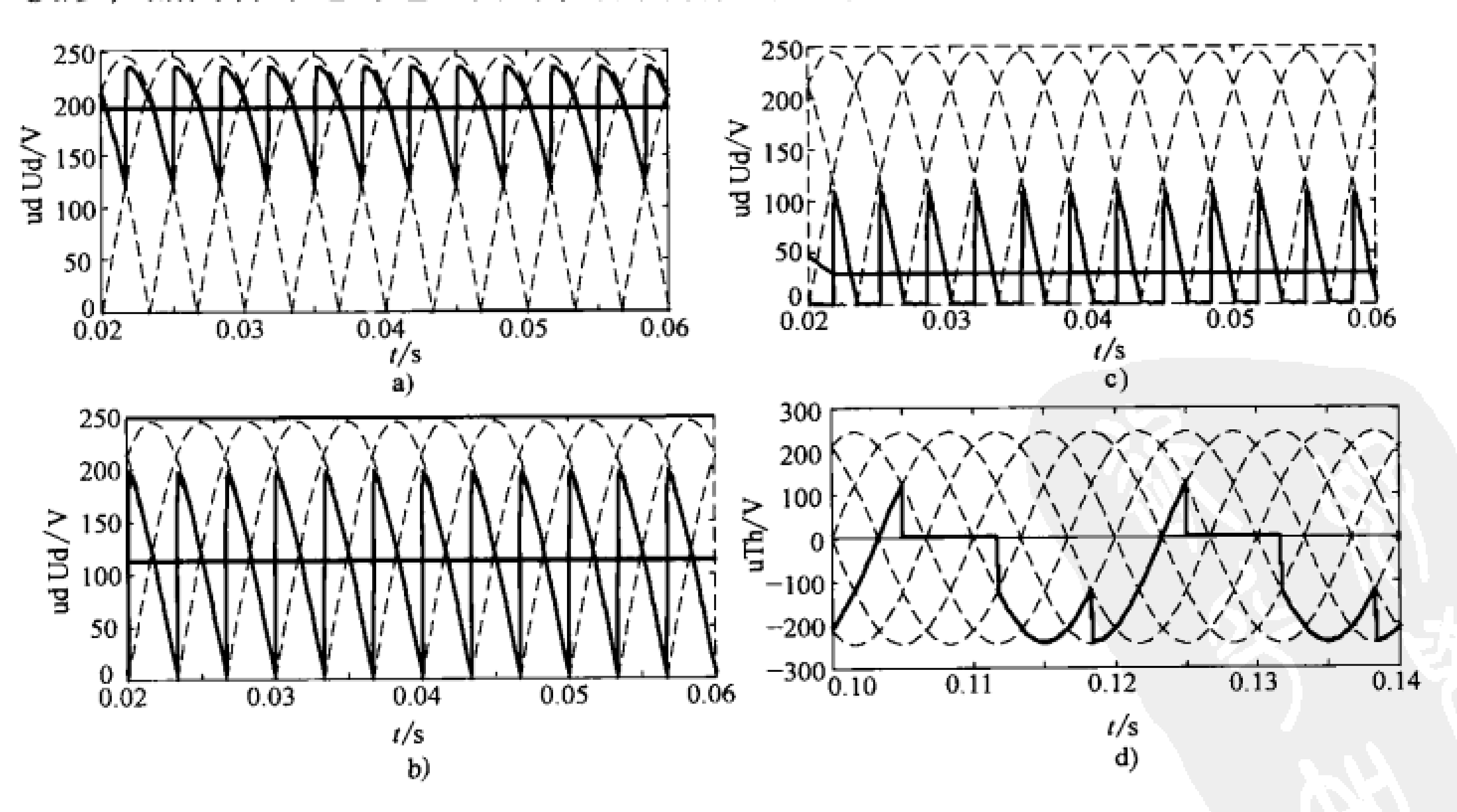


图5-21　α=60°时电阻负载整流器输出电压波形

a）α=30°　b）α=60°　c）α=90°　d）α=30°时晶闸管电压

2）电阻电感负载（R 的值为 0.5Ω、L 的值为 0.01 H）：阻感负载 $\alpha=30°$时，整流器输出电压电流如图 5-22a、b 所示，$\alpha=60°$时，整流器输出电压电流如图 5-23a、b 所示，$\alpha=90°$时整流器输出电压电流如图 5-23c、d 所示，随控制角增加，输出电压下降，说明了控制角对整流器输出的控制作用。在 $\alpha=90°$时，输出电压平均值为零，但是输出电流不为零（见图 5-23d），与 $\alpha=90°$时 $I_d=U_d/R=0$ 不符，电流还有较小的值，这是因为尽管 $\alpha=90°$时输出电压平均值 $U_d=0$，但是输出电压瞬时值 u_d 是随电源电压 u_2 从“+”向“-”变化的，在电源电压为“+”时，晶闸管导通有电流产生，并且在 u_d“-”半周，由于负载电感续流，使晶闸管继续导通，因为这时电流很小，一般忽略不记。因此 $\alpha=90°$时，$I_d=U_d/R=0$ 是工程近似的。

图 5-22d、e、f 是整流电路三相输入电压（细实线）和电流（粗实线）波形，其中电压呈正弦波，电流是矩型波，电流滞后电压 30°，若控制角增加，电流滞后也增大，滞后角基本上与控制角相等。

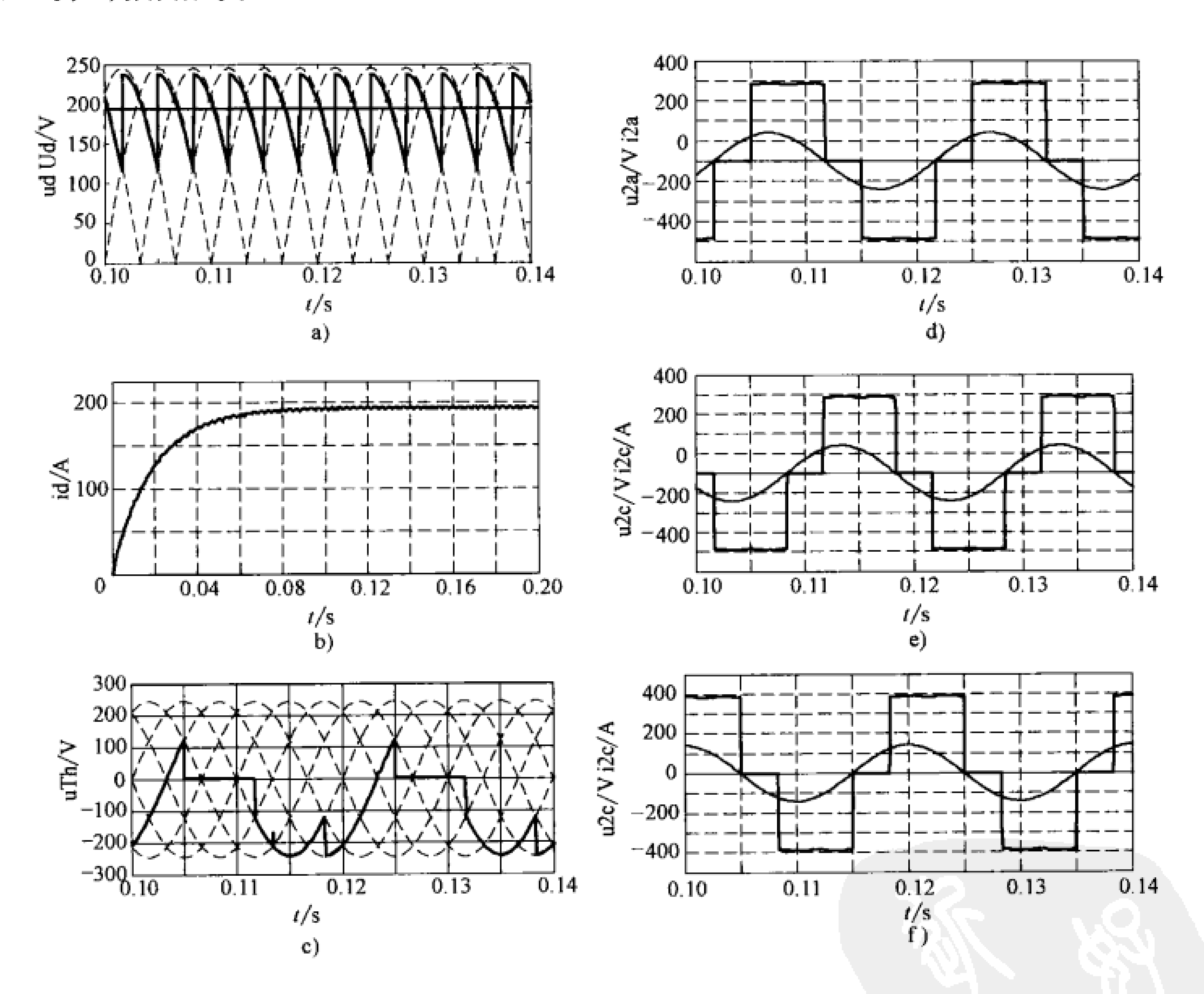


图 5-22　$\alpha=30°$时电感负载整流器输出

a）整流器输出电压　b）整流器输出电流　c）整流器输出电压　d）变压器二次侧 a 相电压电流
e）变压器二次侧 b 相电压电流　f）变压器二次侧 c 相电压电流

3）整流电路的功率因数和谐波：整流电路的功率因数观察模型如图 5-24 所示，模型在图 5-20 整流器模型基础上，通过多路测量仪 multimeter1 读取整流变压器二次电压 $u2a$ 和电流 $i2a$，然后由 Active and Reactive Power 模块计算整流器输入侧的有功功率 P 和无功功率 Q，

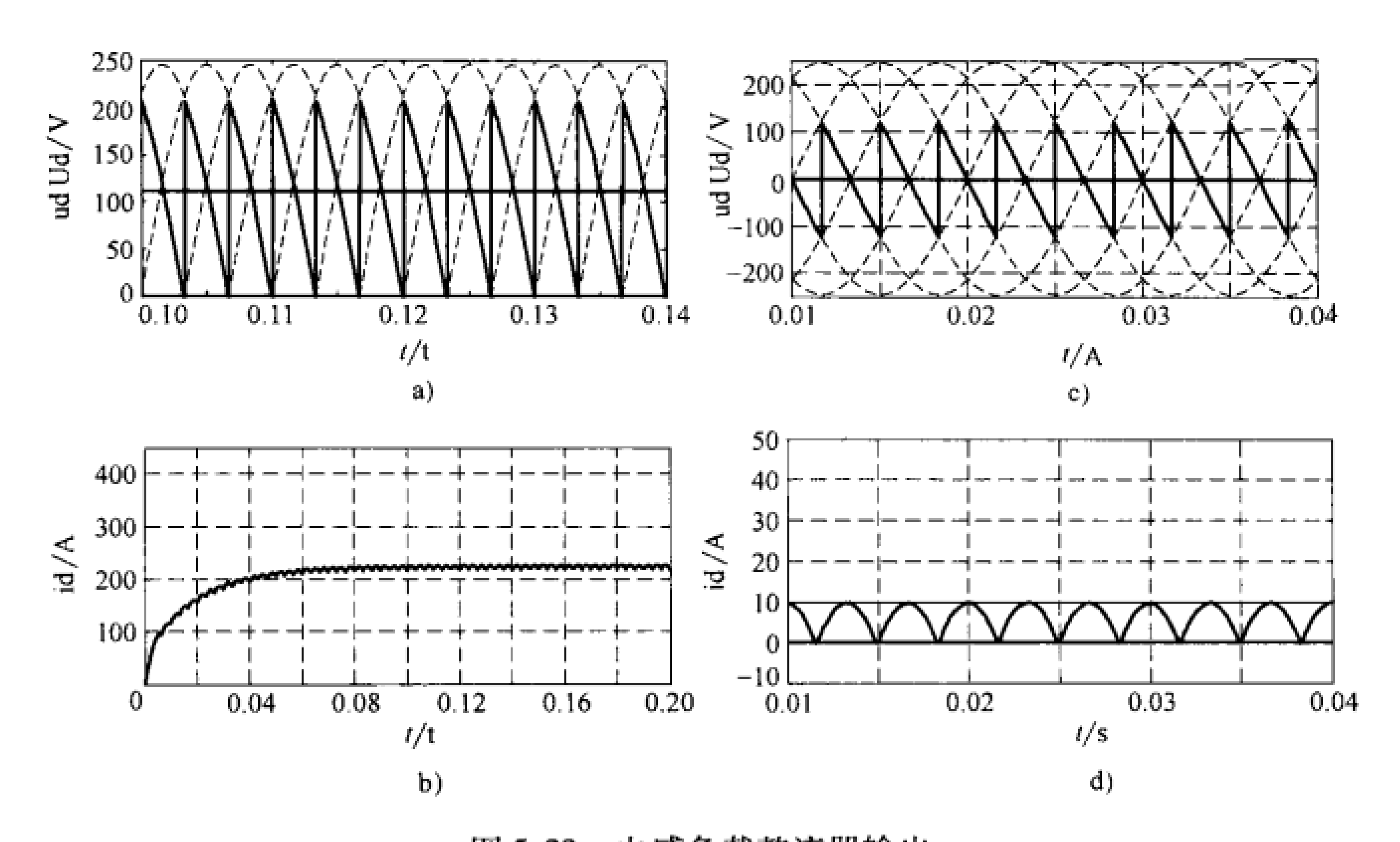


图 5-23　电感负载整流器输出

a）$\alpha=60°$时输出电压　b）$\alpha=60°$时输出电流　c）$\alpha=90°$时输出电压　d）$\alpha=90°$时输出电流

得到的有功功率 P 和无功功率 Q 再经函数模块 Fcn 计算功率因数 PQ，$PQ=\frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}}$。图 5-25 是 $\alpha=30°$时整流器输入有功和无功功率曲线以及功率因数曲线。

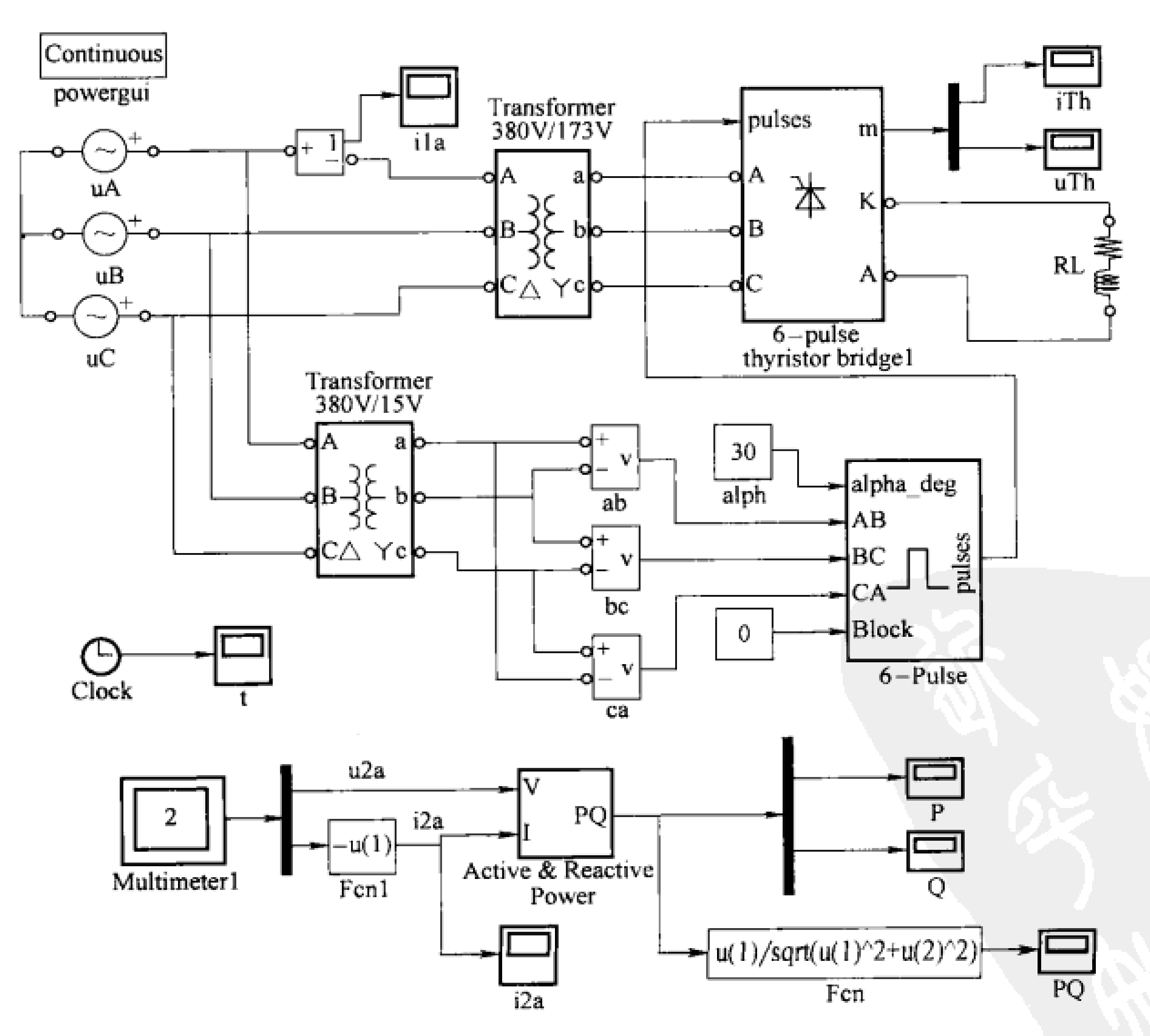


图 5-24　功率和功率因数测量

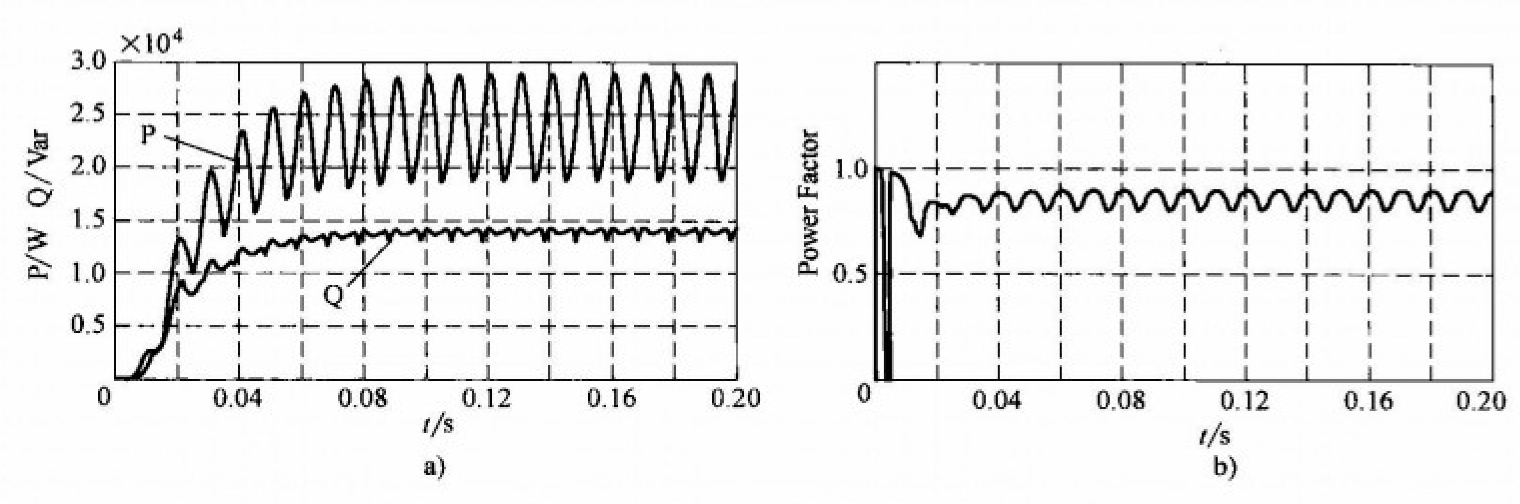


图 5-25 整流器功率和功率因数

a）功率 P-有功功率 Q-无功功率 b）功率因数

整流器的谐波主要研究整流变压器一次电流的谐波、二次电流（即整流器输入电流）的谐波和整流器输出直流电压的谐波。在图 5-24 中以示波器 i1a、i2a 分别观测变压器一、二次电流，观测的波形如图 5-26 所示。因为变压器为△/Y联结，其一次电流呈 6 阶梯波（见图 5-26a），二次电流为矩形波（见图 5-26b），一次和二次电流都不是正弦波，含有谐波。谐波分析可以用 powergui 模块，分析时先将示波器 i1a、i2a 的数据格式取为 structure with time，这样保存的数据可以用 powergui 模块分析，点击 powergui 模块，弹出画面如图 5-27所示。选择其中的 FFT Analysis 功能，得到的画面如图 5-28 所示，图 5-28 中左上方为分析的波形，左下方为波形的频谱，如果在 Structure 栏中选择变压器一次电流 i1a，则画面给

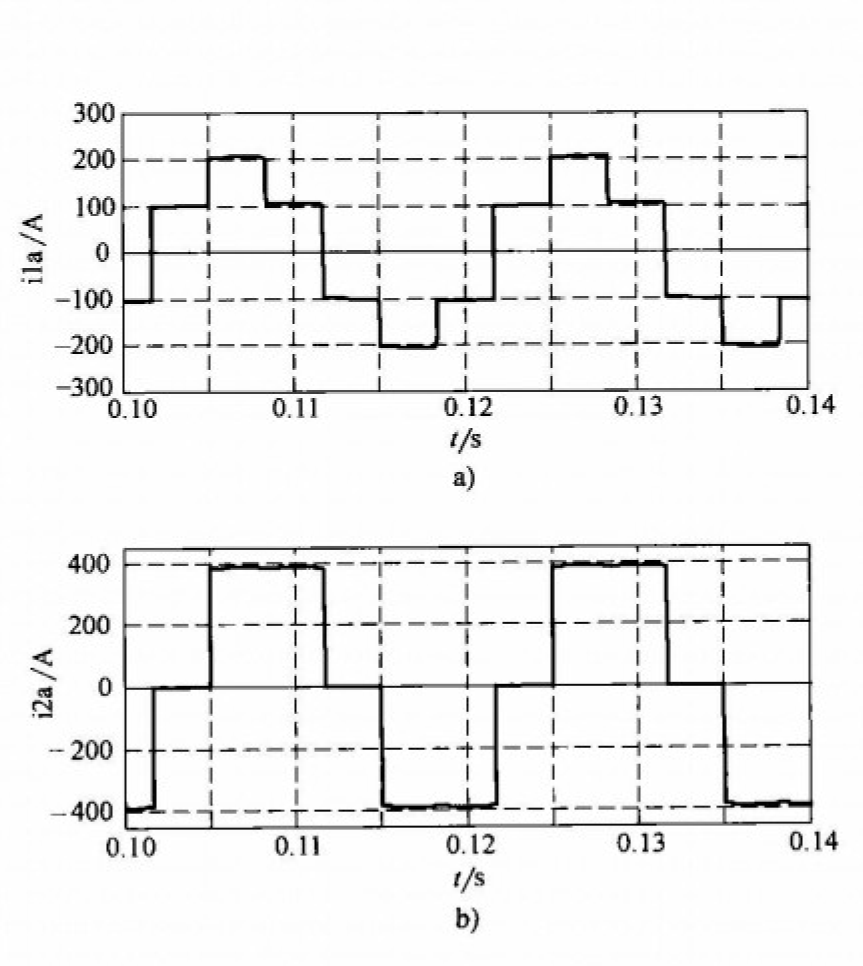


图 5-26 变压器电流

a）变压器一次电流 b）变压器二次电流

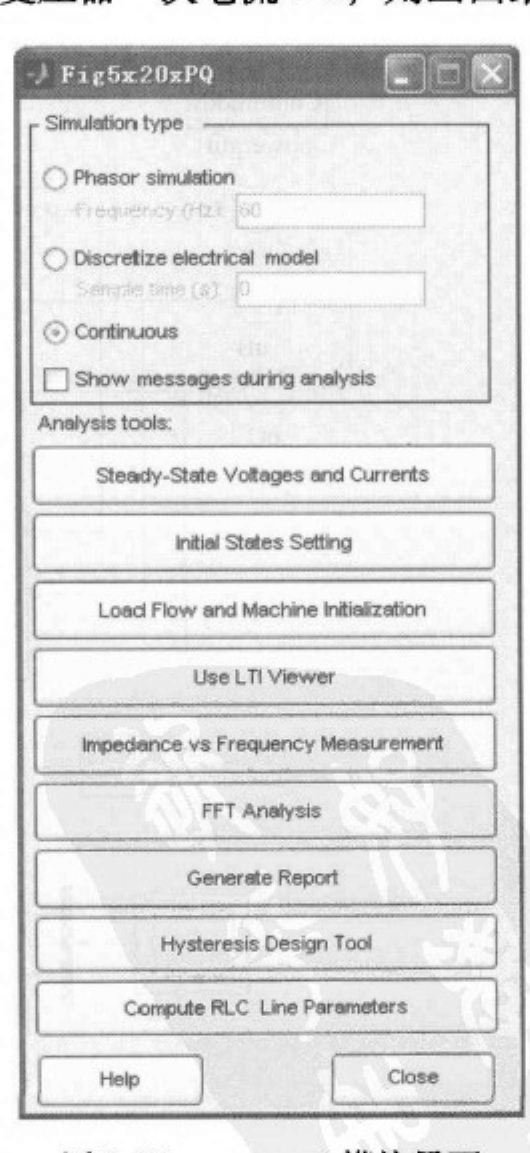


图 5-27 powergui 模块界面

出 $i1a$ 的频谱（见图 5-29）。从频谱可以看出，电流波形中没有偶次谐波，对三相变压器也没有 3 的整倍数次谐波（基波为 50Hz），因此主要的谐波次数为 5、7、11、13、17、19、23、25 ……。

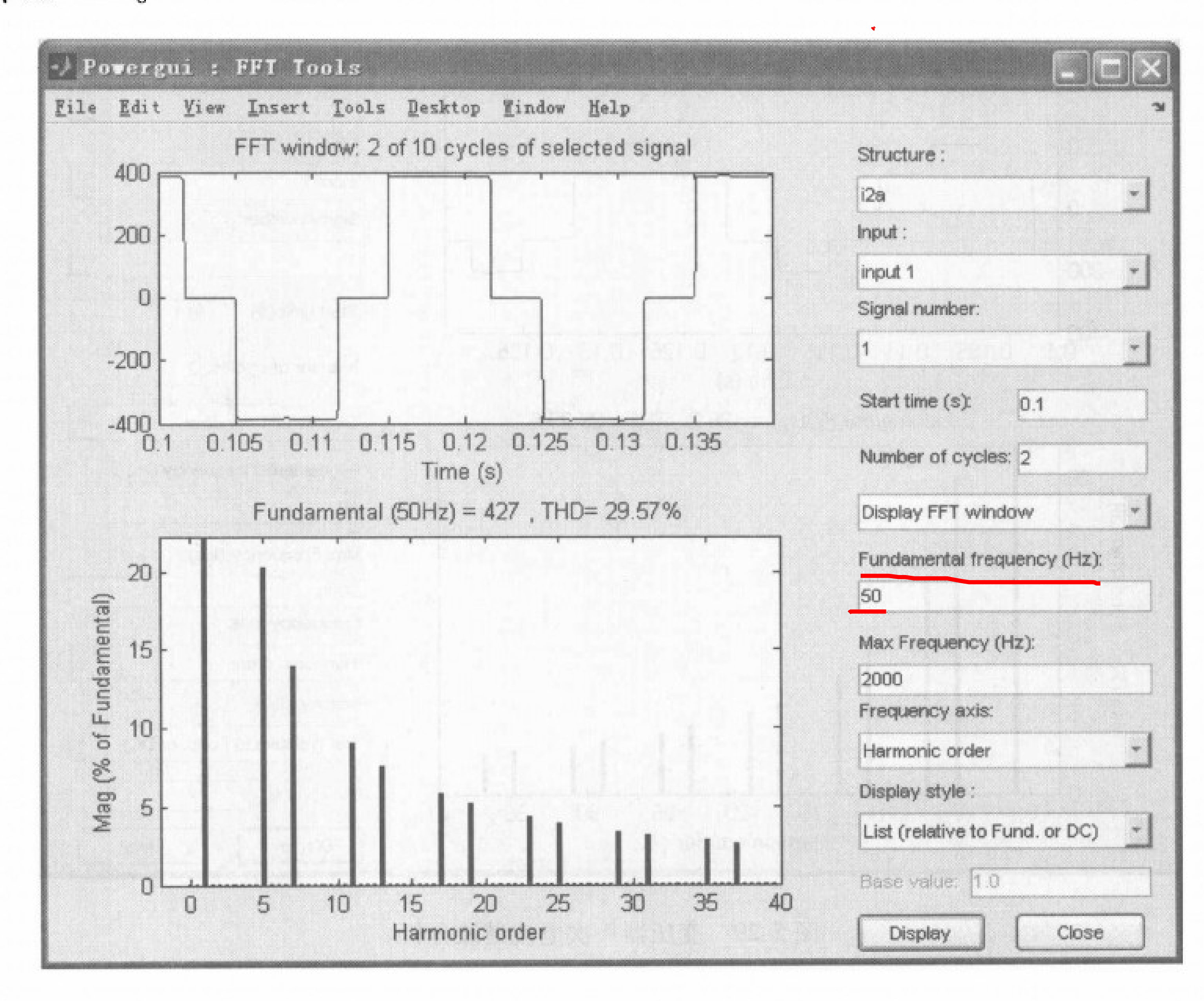


图 5-28　变压器二次电流谐波分析

整流器输出直流电压的谐波分析如图 5-30 所示，频谱中主要是 6、12、18、24、30…次偶次谐波，这与理论分析的结果是一致的，如果在画面右侧，选择 Display style 中的 List 项，则可以从列表中得到谐波的详细信息，改变控制角后，谐波的次数不变，幅值略有变化。

通过以上整流电路的仿真可以看到，现在仿真器件的模型比较完备，模型可以反映器件的各项参数和工作情况，例如变压器不仅有一、二次电压，还有绕组和铁心的参数，晶闸管不仅是通断控制，并且考虑了通态电阻、缓冲保护等措施。因此，仿真的结果与电路的实际运行情况基本一致，仿真可以代替实际系统的实验室试验。Matlab/Simulink 的模型库提供了大量的器件、仪器和控制模块，选用极其方便，这是一般实验室很难具备的，因此仿真已经成为研究和设计的重要工具。

5.1.3　不控整流电路和电容性负载仿真

由电力二极管组成的不控整流器是一种常用的整流器，在充电器、逆变器中广为应用，

二极管整流器经常在其直流侧连接电容滤波，本节研究这类整流器的仿真和性能。

图 5-29 变压器一次电流谐波分析

1. 单相桥式不控整流电路

单相桥式不控整流电路的仿真模型如图 5-31 所示，模型由交流电源 *us*、通用桥式电路模块 Universal Bridge、电容 C 和负载 R 组成。电路模块的主要参数为：交流电源电压 220V，50Hz；通用桥式电路模块器件选择二极管 Diode，二极管使用默认参数，但是缓冲电容可取 inf，缓冲电阻可取大一些，如 100kΩ，因为一般不控整流电路二极管不需要并联缓冲电路。模型中电容取值为 200μF，电阻按需要设置，模型中用多路测量仪接收电源电压和电容电压和电流信号。仿真参数设置：仿真时间为 0.08s，仿真算法为 ode15s。

仿真结果如图 5-32 所示，图中 5-32a 为不接负载电阻 R 时直流侧的输出电压波形，由于电容充电后没有放电的回路，电容充电后输出电压保持的电源电压的峰值 $U_d=\sqrt{2}U_s=\sqrt{2}\times 220V=310V$。图 5-32b、c、d 分别为 R 的值为 200Ω、20Ω 和 2Ω 时的输出电压情况，随着电阻减小，负载电流增加，输出电压波形越来越接近正弦半波，这说明，不控整流电路电容滤波电路输出电压的平均值与负载 R 的大小有关，等效电阻 R 越小，输出电压的波动越大，为了减小输出电压波动，可以增加滤波电容量，因此不控整流电路一般采用大电容滤波。

图 5-33 是 R 的值为 200Ω 时，电源电流 is、整流器输出电流 id、电容电流 ic 和电阻电流 ir 的波形，在起动时，电源电流 is，输出电流 id 和电容电流 ic 都有较大的冲击。电源电

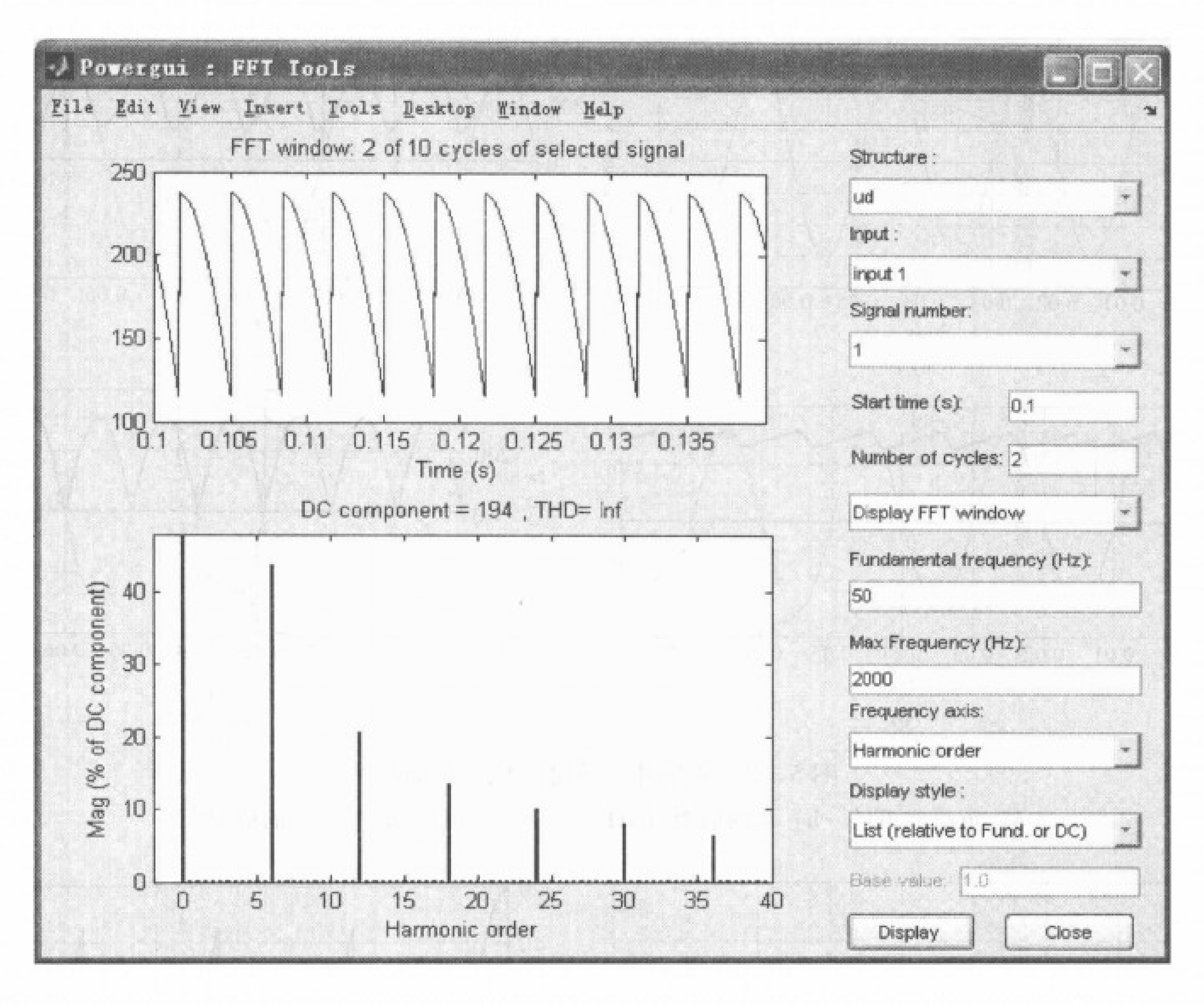


图 5-30　整流器输出电压谐波

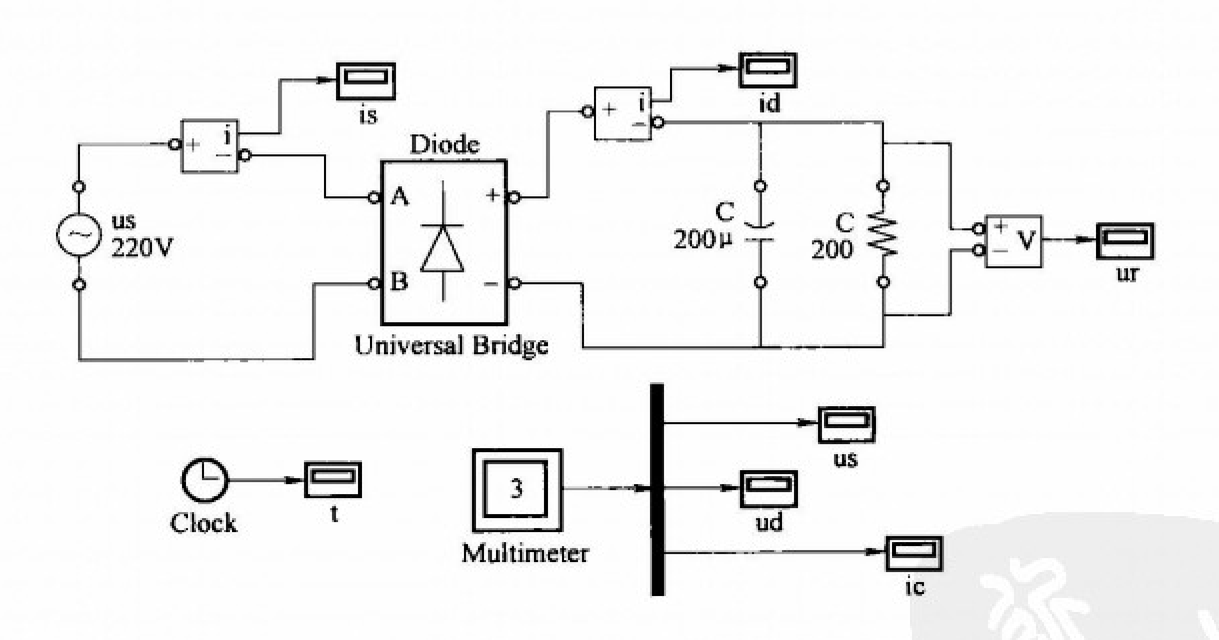


图 5-31　单相不控整流桥电容负载的仿真模型

流 is 是正负交替的交流，电流波形的宽度与电容的充电时间有关。电容电流 ic 的正半周是电容充电，电容两端电压上升（见图 5-33b），ic 的负半周是电容向电阻放电的过程，电阻电流 ir 与电压有相同的波动（见图 5-33d）。

2. 三相不控整流器电容负载

三相不控整流器电容负载电路的仿真可以使用三相二极管整流模块，也可以在可控整流器的基础上设控制角 $\alpha=0°$ 来仿真。三相二极管不控桥带电容负载电路仿真模型如图 5-34

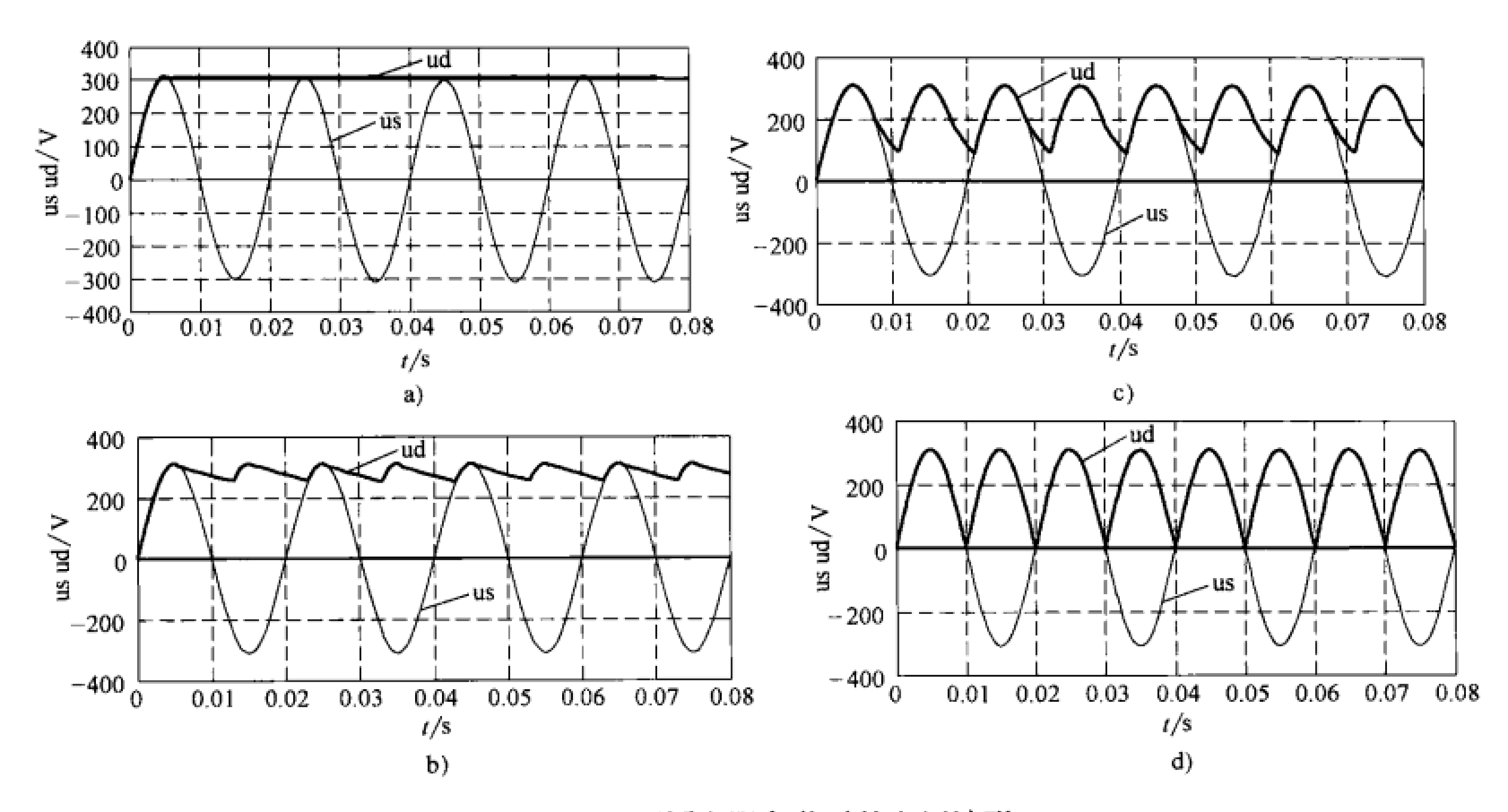


图 5-32 不同电阻负载时的电压波形

a）负载 R 开路 b）R 的值为 200Ω c）R 的值为 20Ω d）R 的值为 2Ω

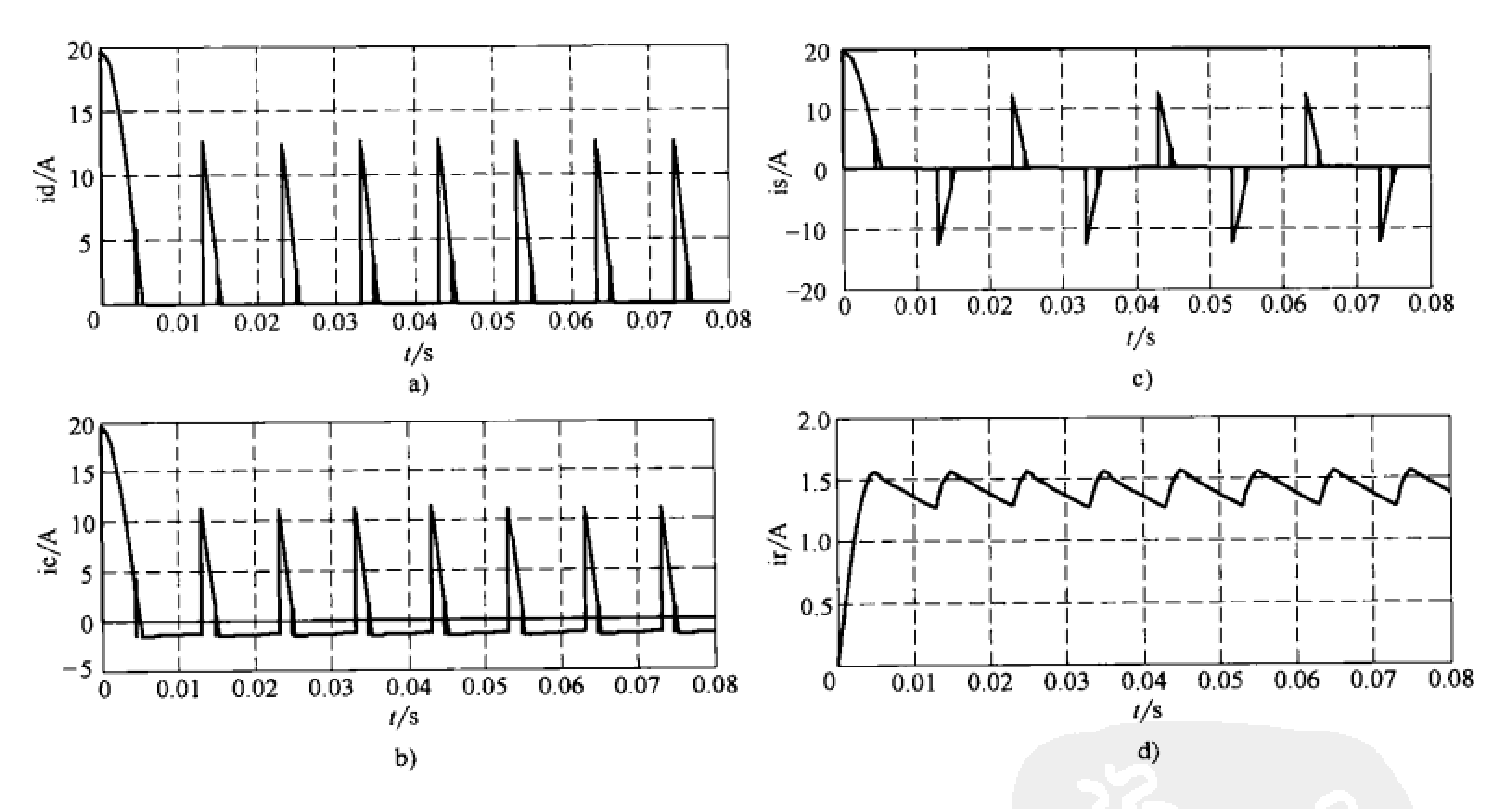


图 5-33 R 的值为 200Ω 时的电流波形

a）整流器输出电流 id b）电容电流 ic c）电源电流 is d）电阻电流 ir

所示。模型由三相电源、三相二极管桥（6-pulse diode bridge）和阻容负载组成。模型中设电源电压为 220V、50Hz，阻容负载 C 的值为 500μF，R 的值为 20Ω、200Ω。仿真结果（见图 5-35）表明，三相整流时整流器输出电压波动较单相整流小，整流器输出电压随负载减小（电阻 R 增加）略有增加，整流器输入电流随负载的减小而减小。在起动时三相的冲击电流不等，因为在电源设置时 A 相相位取“0”，因此 A 相电压从 0 上升，A 相起动电流较小，而 B 相和 C 相电压初值为 $\pm 0.5U_S$，因此起动时冲击电流较大，并且方向相反。

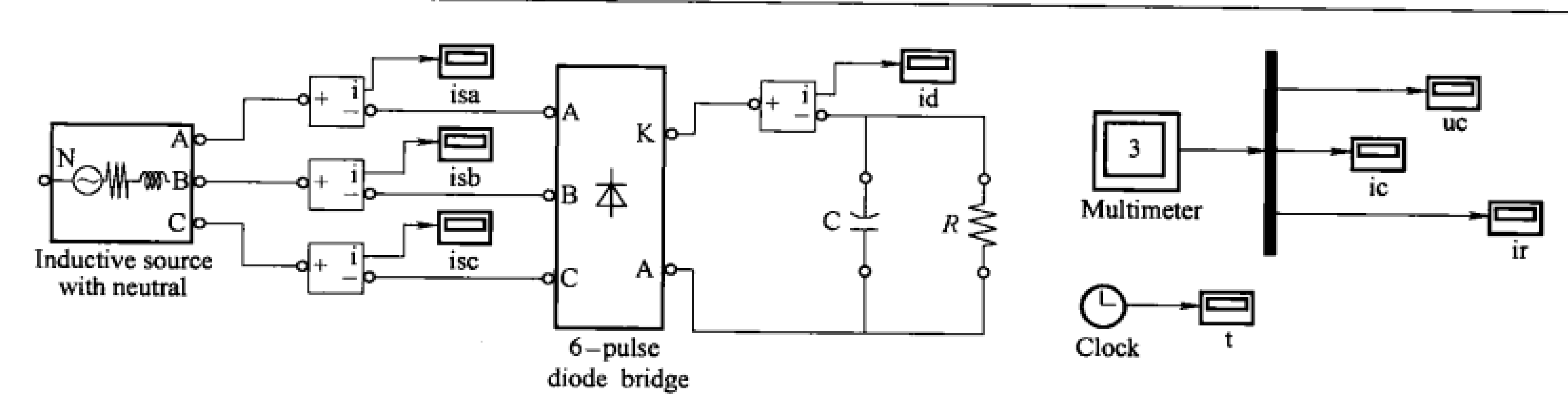


图 5-34　三相不控整流电路仿真模型

图 5-35　电容电阻负载波形

a）R 的值为 20Ω 时整流器输出电压　b）R 的值为 20Ω 时整流器输入电流（A 相）　c）R 的值为 20Ω 时整流器输入电流（B 相）　d）R 的值为 20Ω 时整流器输入电流（C 相）　e）R 的值为 200Ω 时整流器输出电压　f）R 的值为 200Ω 时整流器输入电流（A 相）　g）R 的值为 200Ω 时整流器输入电流（B 相）　h）R 的值为 200Ω 时整流器输入电流（C 相）

5.2 直流-直流变换器

直流-直流变换器也称直流斩波器（DC Chopper）或 DC-DC 变换器。直流-直流变换器用于调整直流电的电压，它有多种类型，这里主要介绍降压（Buck）变换器、升压（Boost）变换器和桥式（H 型）直流变换器的仿真，其他直流变换器的仿真也可以用同样的方法进行。

5.2.1 直流降压变换器设计

直流降压变换器（Buck Chopper）用于降低直流电源的电压，使负载侧电压低于电源电压，其原理电路如图 5-36 所示。在开关元件 VT 导通时，有电流经电感 L 向负载供电，在 VT 关断时，电感 L 释放储能，维持负载电流，电流经负载和二极管 VD 形成回路。调节开关器件 VT 的通断周期，可以调整负载侧输出电流和电压的大小。负载侧输出电压的平均值为

$$U_{\mathrm{R}}=\frac{t_{\mathrm{on}}}{T}E=\alpha E$$

式中，T 为 VT 的开关周期，t_{on}为 VT 导通时间，α 为占空比。

降压变换器主电路的设计除要选择开关器件和二极管外，还需要确定电感 L 的参数，电感参数的计算是复杂的，但采用仿真却很方便。仿真模型电路如图 5-37 所示。在模型中开关器件采用了 IGBT，IGBT 的驱动信号由脉冲发生器 Pulse 产生，设定脉冲发生器的脉冲周期和脉冲宽度可以调节脉冲占空比。模型中连接了多个示波器，用于观察电路中各部分电压和电流波形，并且通过付里叶分析来检测输出电压的直流分量和谐波。

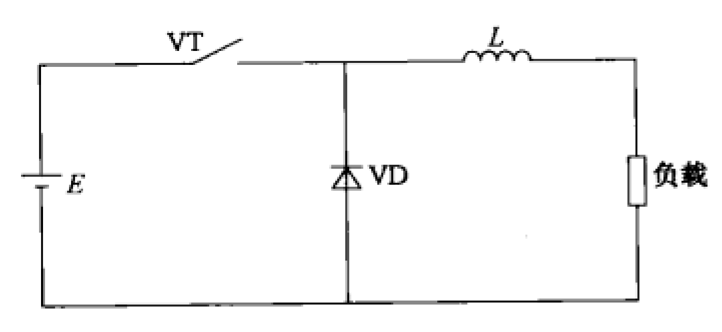


图 5-36 直流降压变换器原理图

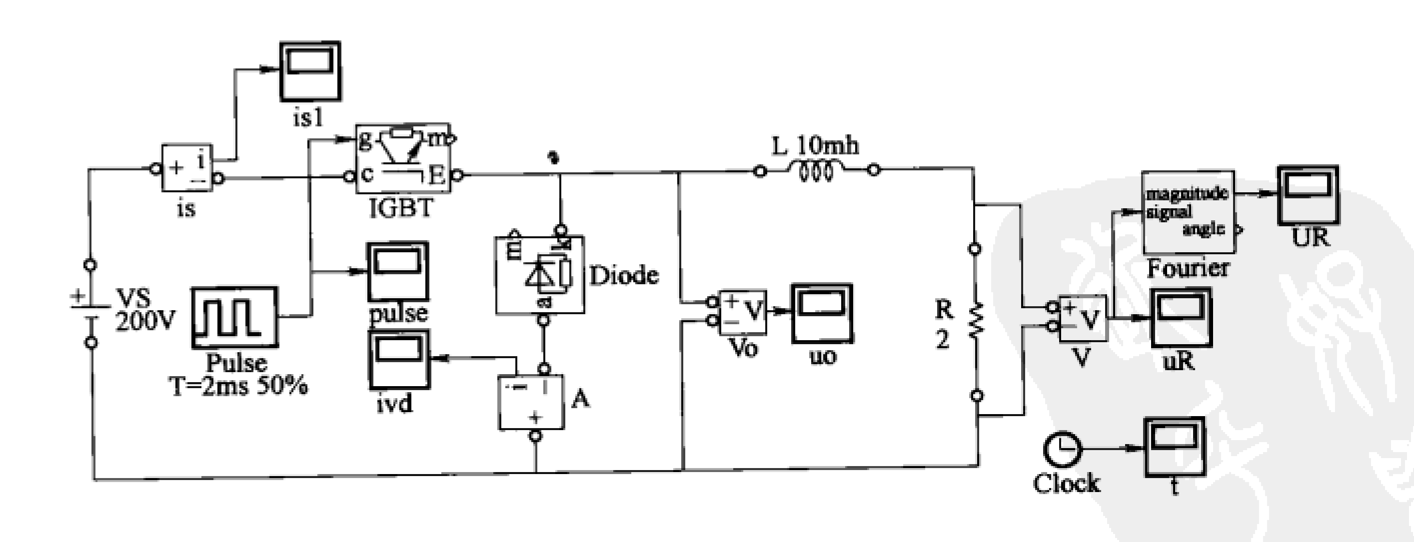


图 5-37 直流降压变换器仿真模型

【例 5-2】 设直流降压变换器电源电压 $E=200\mathrm{V}$，输出电压 $U_{\mathrm{R}}=100\mathrm{V}$，电阻负载 $R=5\Omega$。观察 IGBT 和二极管的电流波形，并设计电感和输出滤波电容值。

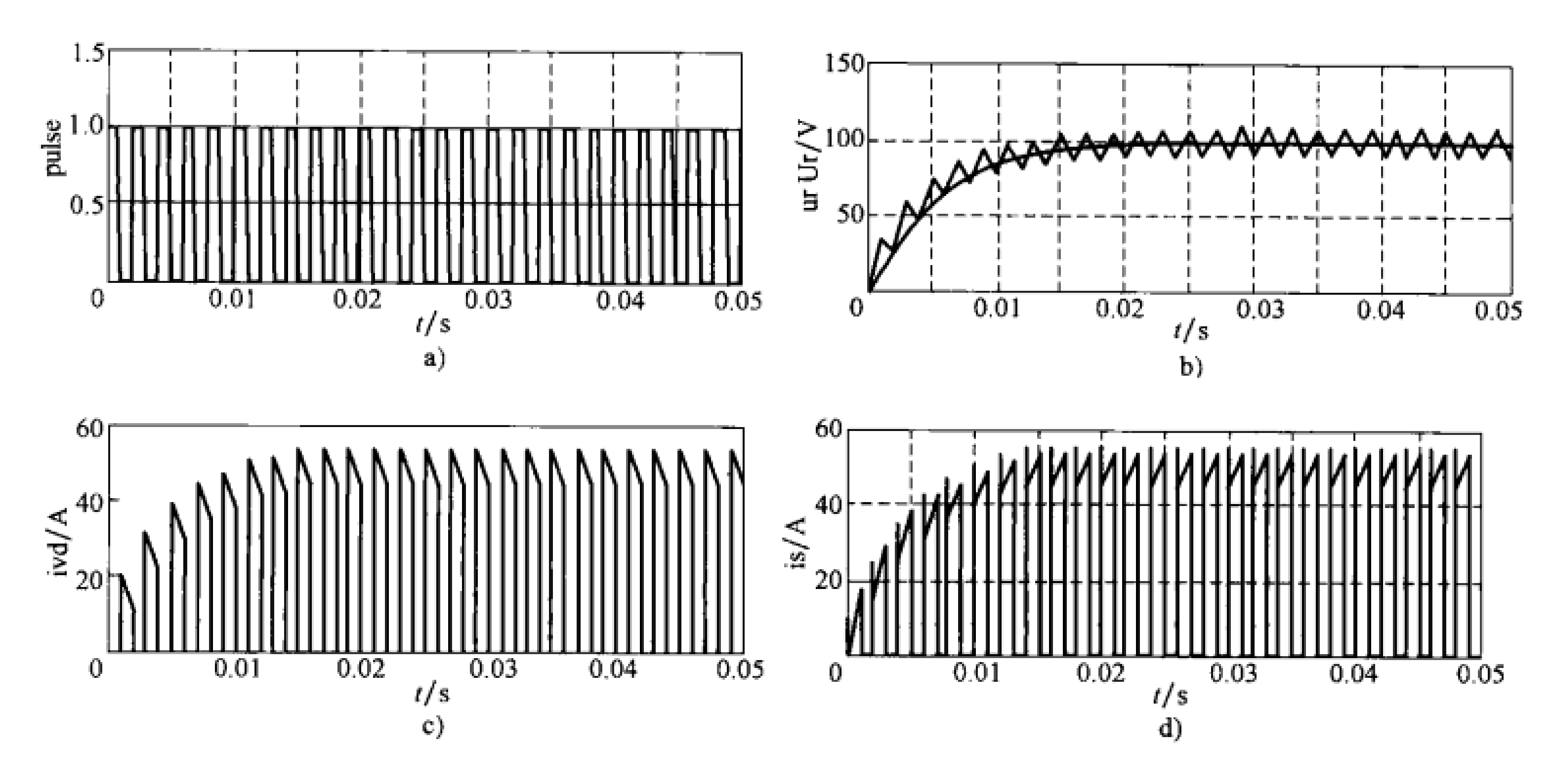


图 5-38　直流降压变换器仿真结果

a）IGBT 的驱动信号　b）输出电压　c）二极管电流　d）IGBT 电流

仿真步骤：

1）在模型中设置参数见表 5-3。

表 5-3　直流降压斩波器模型参数

模　　块	参　数　名	参　数　值
直流电源 Vs	Amplitude/V	200
电感模块 L	Inductance/H	0.01
电阻模块 R	Resistance/Ω	5
脉冲模块	Period*Ts*/s	0.002
Pulse	Pulse Width(%)	50

模型中 IGBT 和二极管的参数可以保持蕴含值，电源电压和负载电阻可以根据实际情况设定，驱动脉冲宽度和电感值可以根据对输出电压电流的脉动要求选择。

2）设置仿真时间为 0.05s，算法 ode15s。

3）起动仿真，仿真结果如图 5-38 所示，其中图 5-38a 为 IGBT 的驱动脉冲，IGBT 的开关频率为 500Hz，占空比为 0.5。图 5-38b 为负载两端电压波形，其中粗线为输出电压的平均值，改变占空比可以调节输出电压值。图 5-38c 和图 5-38d 分别为二极管和 IGBT 的电流，根据此电流可以选择二极管和 IGBT 的电流值。从图 5-38b 的输出电压波形可以看到，在所选参数下输出电压的波动还比较大，增大电感量可以减少输出电压的脉动，但是电感大电感的体积也大。一般既要减少输出电压的脉动又要使电感不太大，可以采取的措施是提高变换频率和采用电容滤波。

4）图 5-39a 是在降压变换器输出端连接 LC 滤波器后的仿真模型，图 5-39b 是滤波器 L 为 0.1mH、C 为 100μF、占空比为 70% 时，降压变换器的输出电压波形，尽管电感减小，但是输出电压脉动较图 5-38b 的电压脉动显著减小，使输出电压更平稳。

从以上举例可以看到，用仿真来设计电力电子电路，修改电路结构和参数很方便，观察

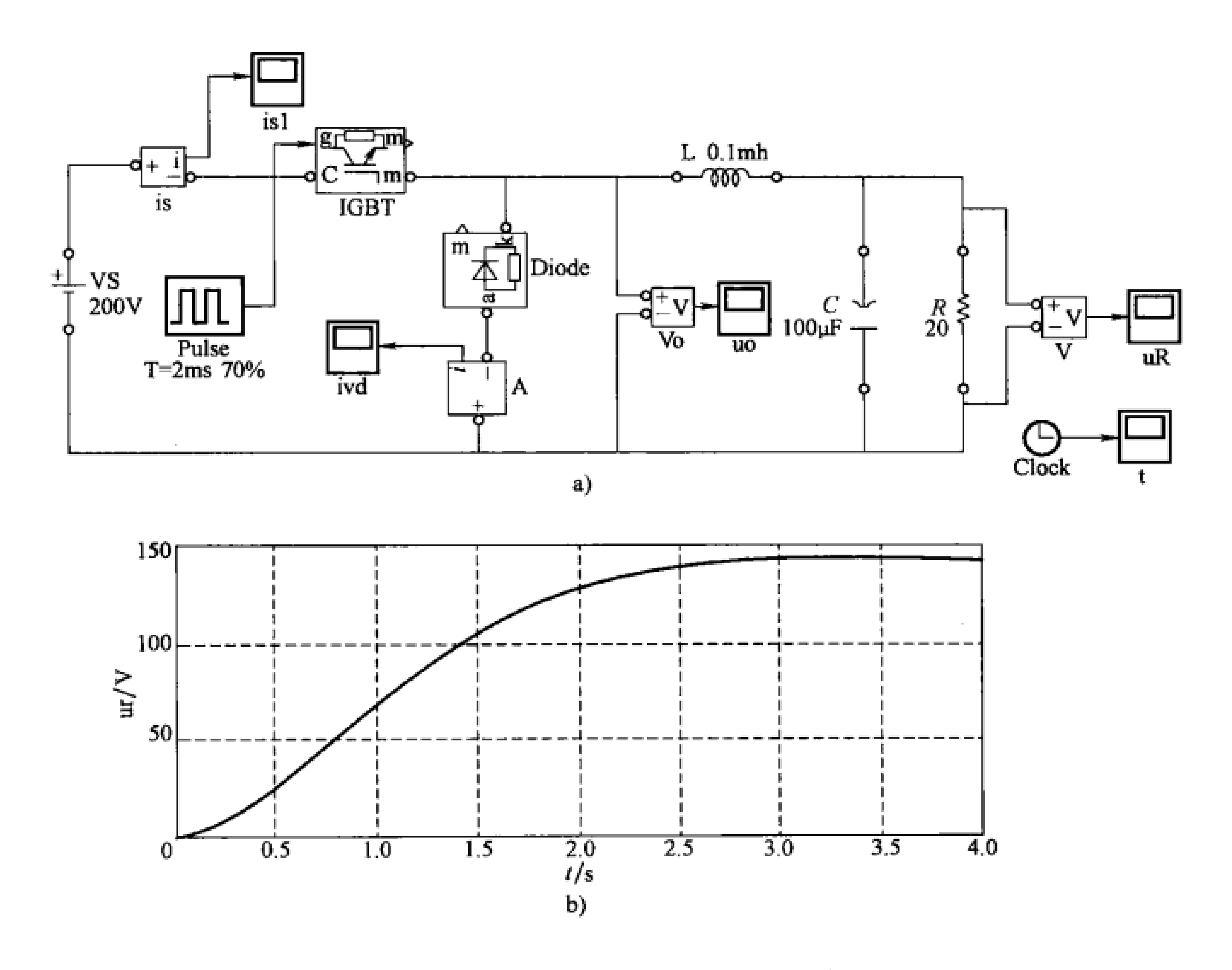


图 5-39　带输出滤波的降压变换器仿真

a）带输出滤波的降压变换器模型　b）滤波后降压变换器输出电压波形

设计的效果更直观。

5.2.2　直流升压变换器设计

直流升压变换器（Boost Chopper）用于需要提升直流电压的场合，其原理电路如图5-40所示。图中 IGBT 导通时，电流由电源 E 经升压电感 L 和开关 VT 形成回路，电感 L 的电流增加，电感储能；当 IGBT 关断时，电感产生的反电动势和直流电源电压串联后共同向负载供电，由于在 IGBT 关断时电感的反电动势和直流电源电压方向相同互相叠加，从而在负载侧得到高于电源的电压。二极管的作用是阻断 IGBT 导通时，电容的放电回路。直流升压变换器的输出电压 $U_0=\dfrac{1}{1-\alpha}E$，其电感和电容值选择，同样可以通过仿真来确定。

【例 5-3】　已知直流电源 24V，要求将电压提升到 100V，且输出电压的脉动控制在 10% 以内，负载的等值电阻为 5Ω。设计一个直流升压变换器，并选择斩波频率、电感和电容参数。

仿真设计步骤：

1）根据直流升压变换器原理电路建立变换器的仿真模型，如图 5-41a 所示。

2）设置元器件参数。取脉冲发生器脉冲周期为 $T\text{s}=0.2\text{ms}$，脉冲占空比：$\alpha=\dfrac{U_0-E}{U_0}=\dfrac{100-24}{100}=0.76$，取脉冲宽度为 76%，初选 $L=0.1\text{mH}$　$C=100\mu\text{F}$。

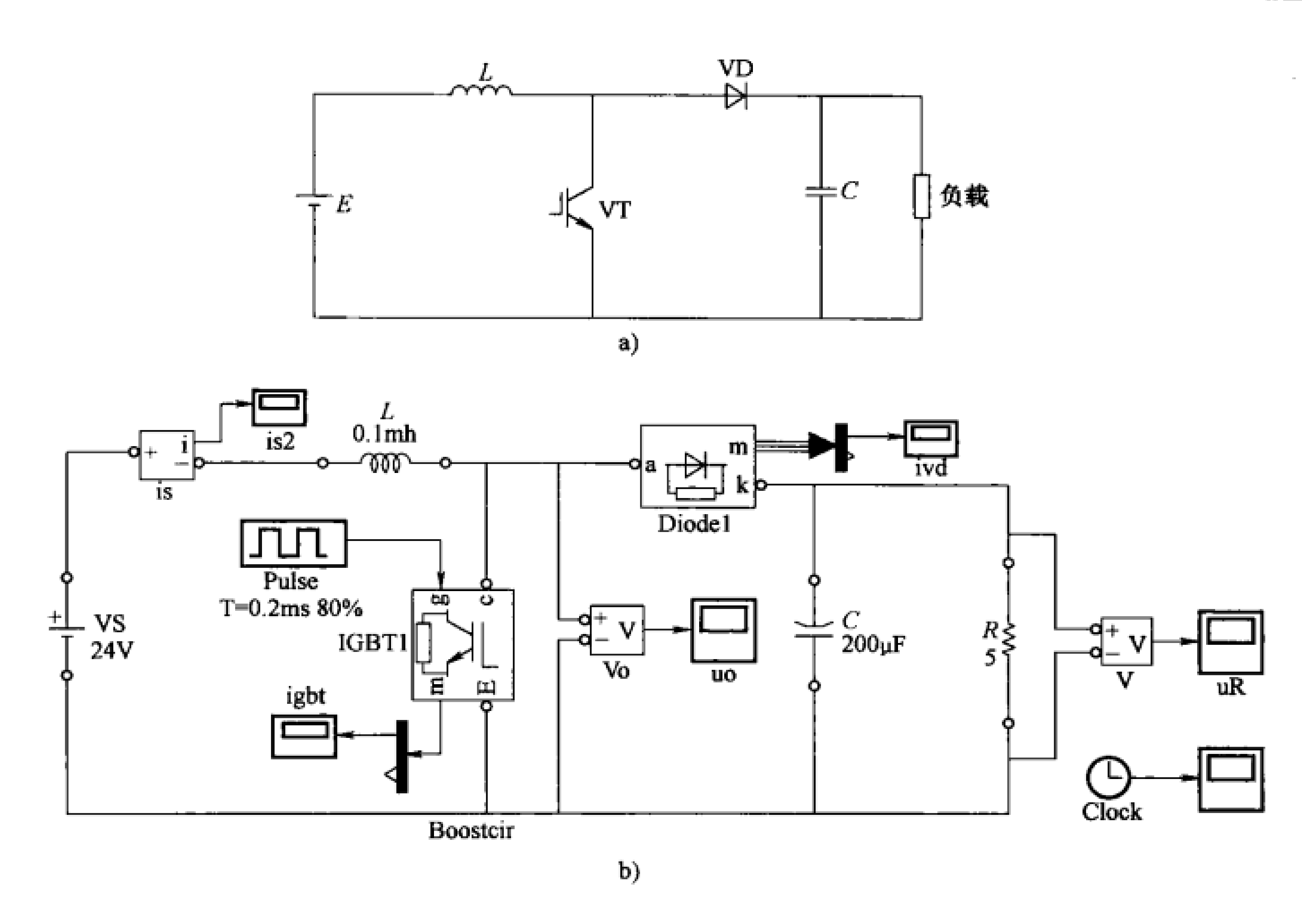


图 5-40　直流升压斩波器

a）直流升压斩波器电路　b）直流升压斩波器模型

3）设置仿真参数，取仿真时间为 0.01s，仿真算法 ode15。

观察仿真结果，从图 5-41c 可见，选择的参数已能满足要求，输出电压达到 100V，脉动在 10 % 以内。如果需要进一步减少输出电压波动，可以提高脉冲发生器产生脉冲的周期，并选择多组 *LC* 参数比较，以得到更满意的结果。

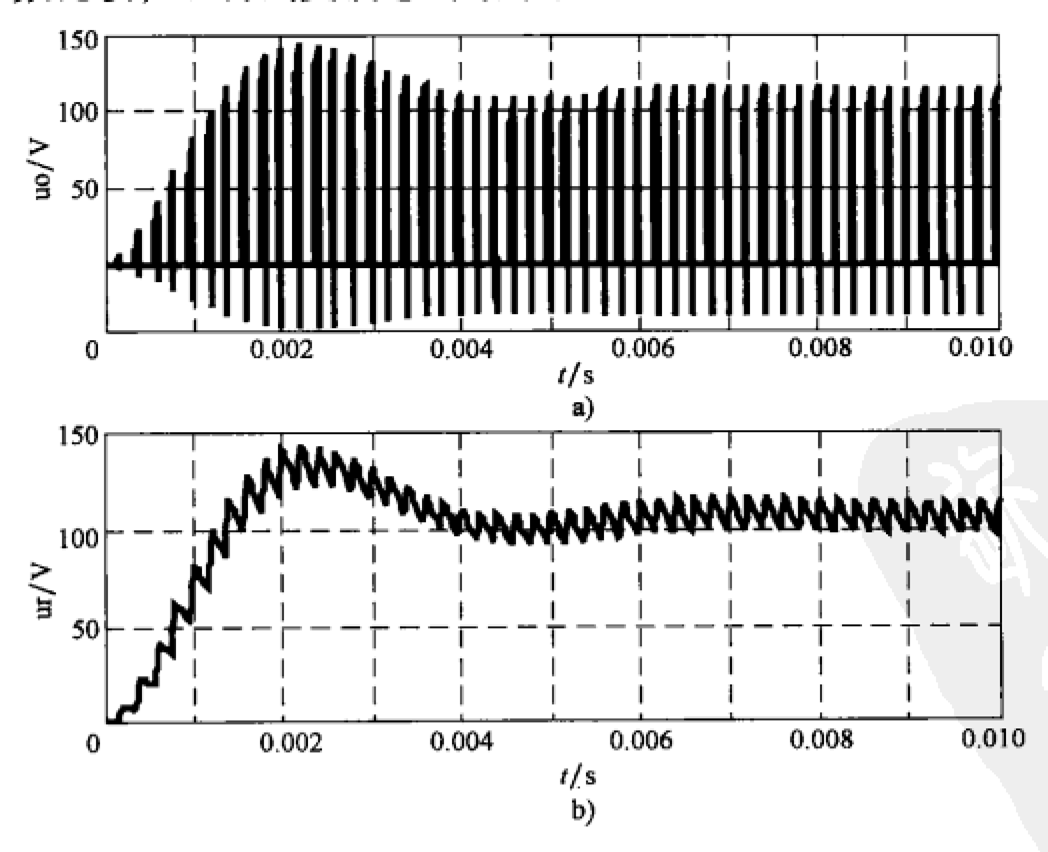


图 5-41　直流升压变换器仿真模型及结果

a）IGBT 两端电压波形　b）输出电压波形

5.2.3 Cuk 升降压变换电路仿真

Cuk 电路是一种既可以用于直流升压也可以用于降压的电路，电路结构如图 5-42 所示，电路只有一个开关器件 VT，在 VT 导通时，电感 L_1 电流上升，在 VT 关断时，电源 E 和电感 L_1 的反电势共同给电容 C_1 充电，C_1 电压可以高于电源电压 E。在 VT 导通时，电容 C_1 也经 C_2、L_2 回路放电，使电容 C_2 电压受开关 VT 驱动脉冲的占空比控制，$U_d = \alpha U_{C_1} = \dfrac{\alpha}{1-\alpha}E$。在 VT 关断时电感 L_2 经二极管 VD 和 C_2 回路续流。Cuk 电路的特点是输入和输出侧都串联了电感，而电感 L_2 和电容 C_2 的滤波作用，减小了负载 R 的电压和电流波动。Cuk 电路的仿真模型如图 5-43 所示，模型中开关器件采用了 MOSFET，因为 MOSFET 内部有一个寄生二极管，因此串联了一个二极管 Diode1，以阻断寄生二极管的通路。

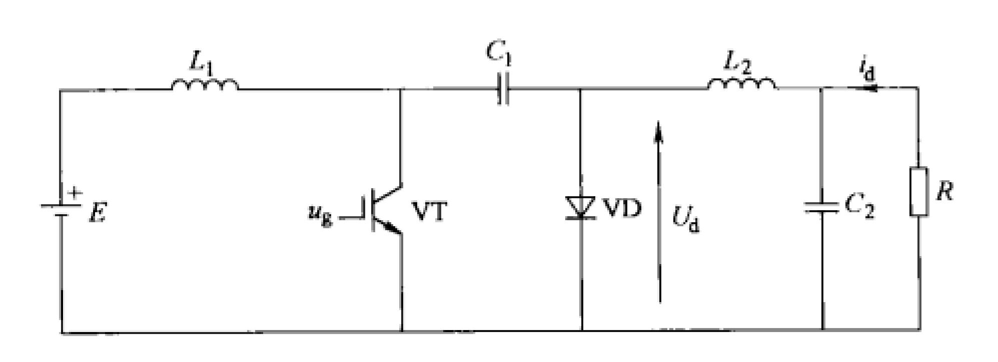


图 5-42 Cuk 升降压变换电路

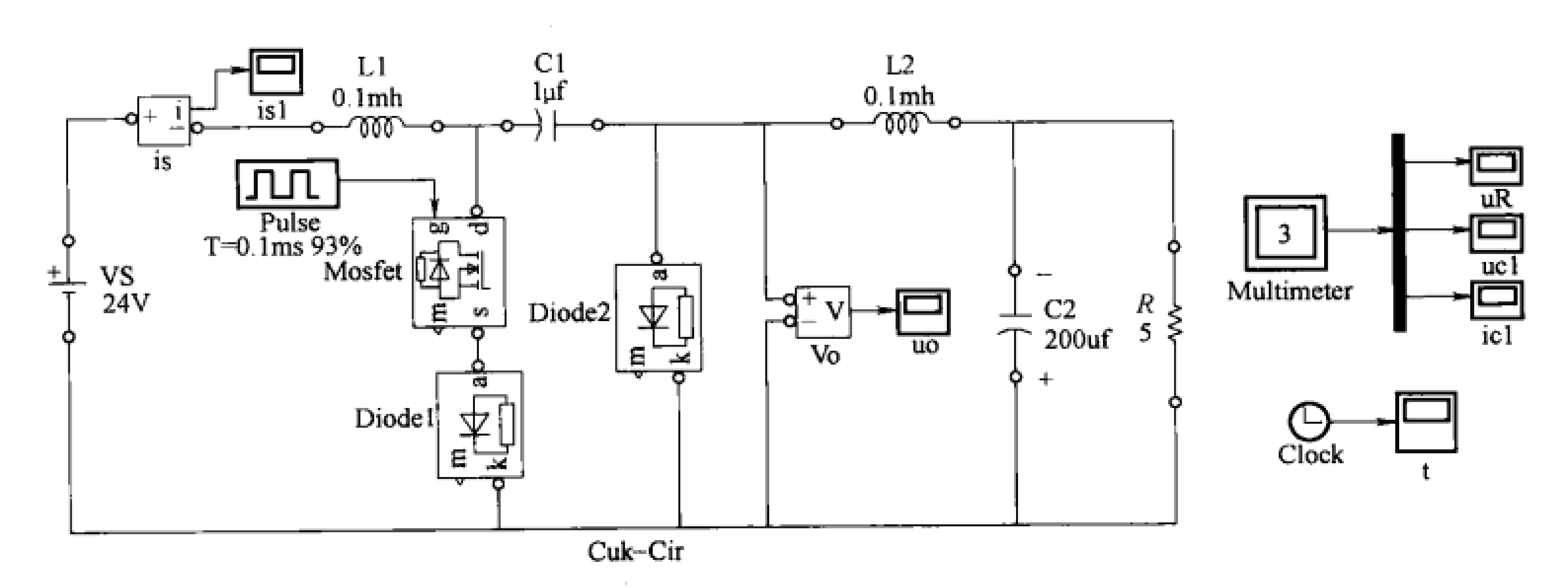


图 5-43 Cuk 升降压变换电路模型

【例 5-4】 采用 Cuk 电路将直流电源 24V 提升到 100V，设计模型主要参数为：电源 vs 为 24V，L 为 0.1mH，L 1为 0.1mH，C 1为 1μF，C 2为 200μF，R 为 5Ω。取脉冲发生器脉冲周期为 Ts =0.1ms，取脉冲宽度为 93%，仿真时间设为 0.01s，仿真算法 ode15。

仿真结果如图 5-44 所示，与图 5-41 比较，Cuk 电路的升压效果较 Boost 电路好，因为 L2 和 C2 的滤波作用，输出电压的波动较小（见图 5-44a），但是电容 C1 两端峰值电压较高，达 600V（见图 5-44c），对电路元器件的耐压要求较 Boost 电路为高。在 MOSFET 导通时，uc1 上升，电流 ic1 为正，在 MOSFET 关断时 uc1 下降，电流 ic1 为负（见图 5-44d），负的电流 ic1 将经 C2、L2 流通，注意：C2 电压为下 “+” 上 “-”。

5.2.4 桥式直流 PWM 变换器仿真

桥式直流 PWM 变换器又称 H 型变换器和四象限直流-直流变换器，桥式直流 PWM 变换器常用作直流电动机的可逆运行，其原理电路如图 5-45 所示。图中的开关器件可以是电力

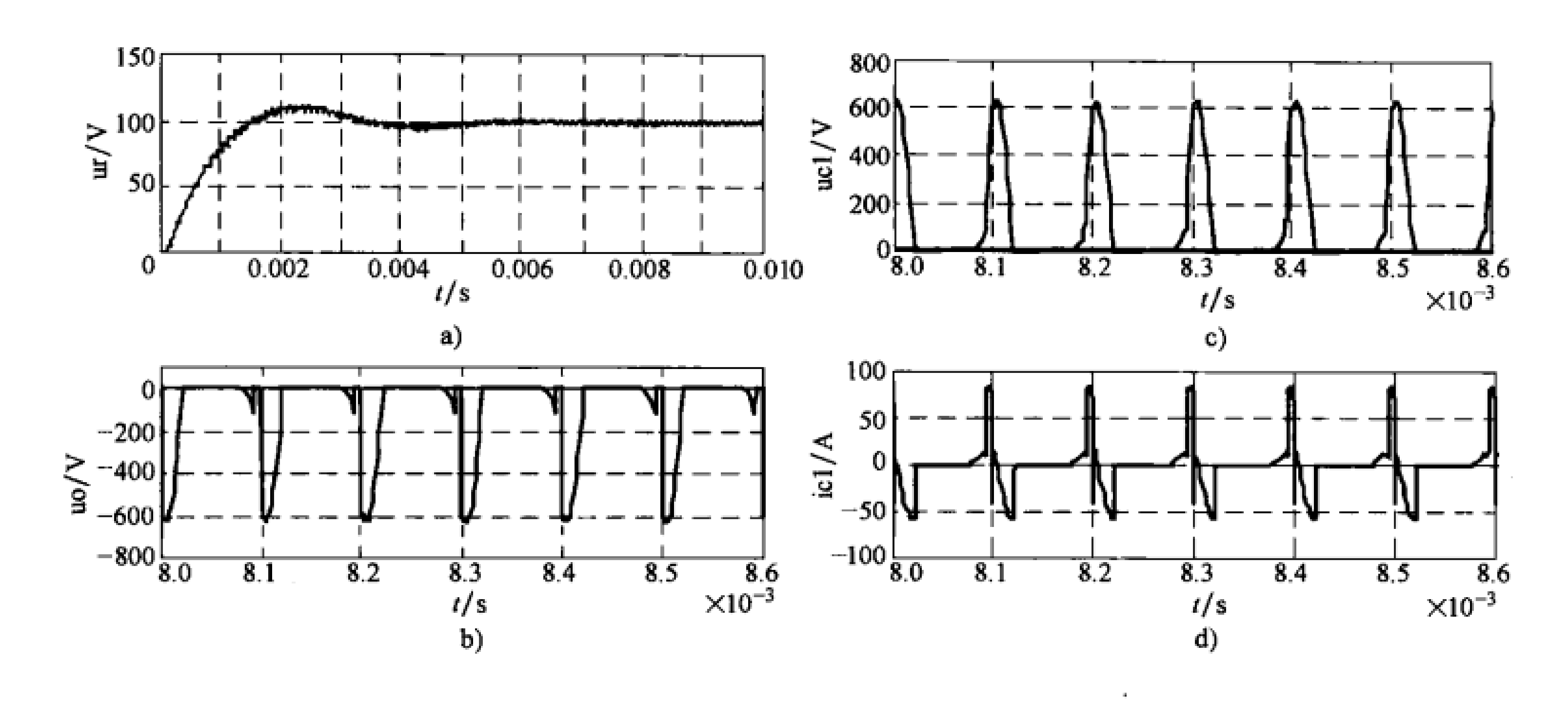


图 5-44　Cuk 斩波电路波形
a）输出电压　b）二极管两端电压　c）电容 C1 两端电压　d）电容 C1 电流

晶体管、电力场效应晶体管和 IGBT 等。桥式可逆直流 PWM 变换器从控制方式上区分有双极式调制、单极式调制和受限单极式调制三种。

1）双极式调制：4 个开关器件 VT1 和 VT4、VT2 和 VT3 两两成对同时导通和关断，且工作于互补状态，即 VT1 和 VT4 导通时 VT2 和 VT3 关断，反之亦然。控制开关器件的通断时间（占空比），可以调节输出电压的大小，若 VT1 和 VT4 的导通时间大于 VT2 和 VT3 的导通时间，则输出电压平均值为正，若 VT2 和 VT3 的导通时间大于 VT1 和 VT4 的导通时间，输出电压平均值为负，所以可用于直流电动机的可逆运行。变换器 4 个开关器件的驱动一般都采用 PWM 方式，由调制波（三角波或锯齿波）与直流信号比较产生驱动脉冲，由于调制波频率较高（通常在数千赫兹以上），所以变换器输出电流一般连续，用于直流电机调速时电枢回路不用串联电抗器，但 4 个开关器件都工作于 PWM 方式，开关损耗较大。

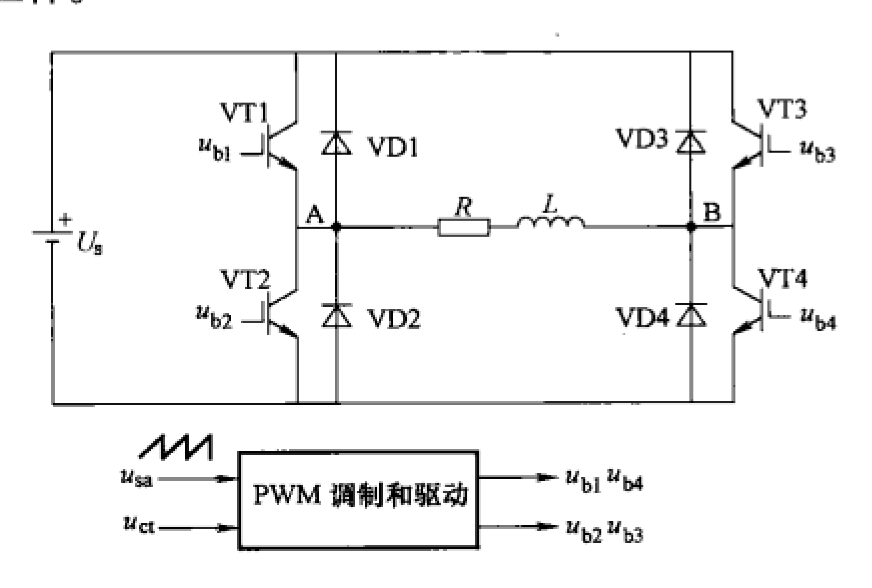


图 5-45　桥式直流 PWM 变换器

2）单极式调制：4 个开关器件中 VT1 和 VT2 工作于互补的 PWM 方式，而 VT3 和 VT4 则根据电动机的转向采取不同的驱动信号，电动机正转时，VT3 恒关断，VT4 恒导通；电动机反转时，VT3 恒导通 VT4 恒关断。由于减少了 VT3 和 VT4 的开关次数，开关损耗减少，这是单极式调制的优点。

3）受限单极式调制：在单极式调制基础上，为进一步减小开关损耗和减少桥臂直通的可能性，在电动机要求正转时，只有 VT1 工作于 PWM 方式，VT4 始终处于导通状态，而 VT2 和 VT3 都关断；电动机反转时，只有 VT2 工作于 PWM 方式，VT3 始终处于导通状态，而 VT1 和 VT4 都关断，这就是受限单极式调制。在受限单极式工作模式，当电动机电流较

小时会出现电流断续的现象。

双极式调制直流 PWM 变换器的仿真模型如图 5-46 所示，图中桥式连接的开关器件

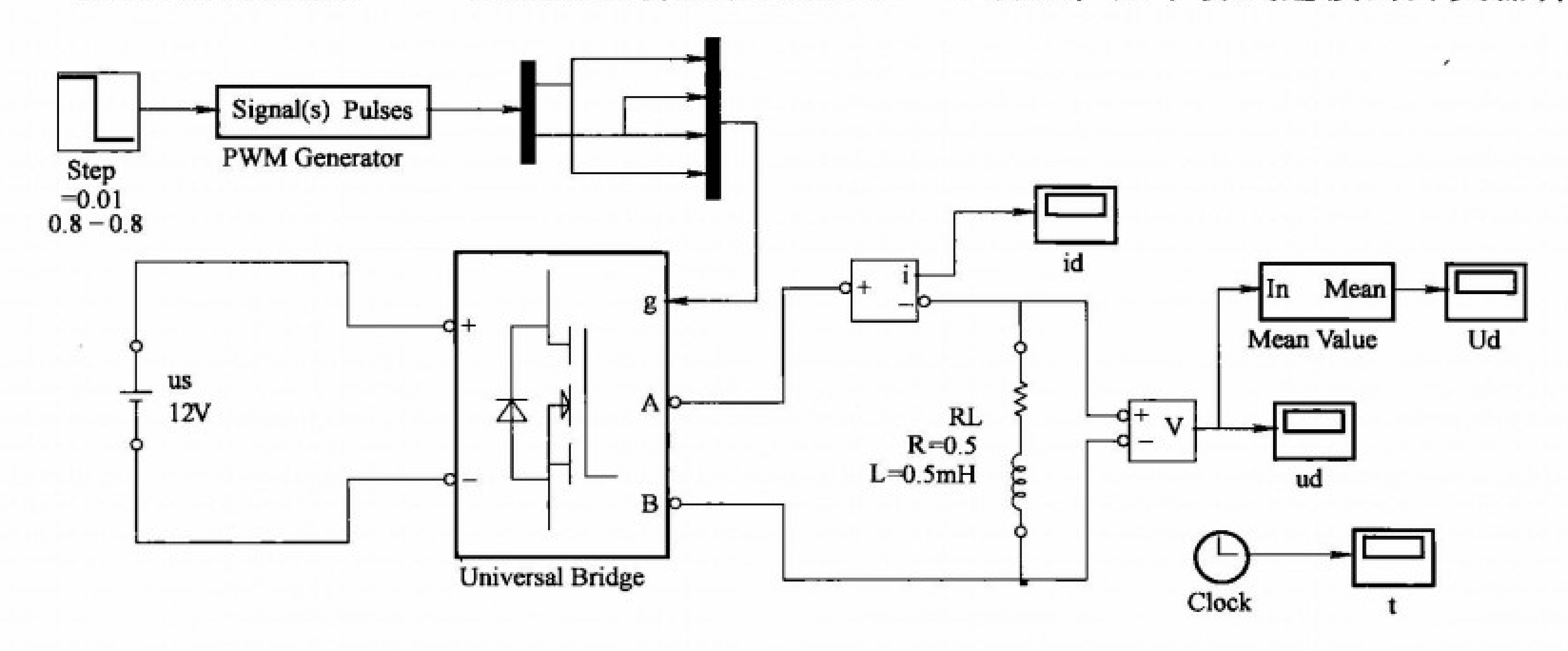


图 5-46　桥式直流 PWM 变换器（双极式调制）的仿真模型

VT1～4 电路采用 Universal Bridge 模块，模块的设置参数如图 5-47 所示。驱动电路采用了 PWM Generator 模块，因为双极性控制的桥式电路开关器件两两成对通断，因此 Universal Bridge 模块参数中桥臂数（Number of bridge arms）选择“1”，产生互补的两个驱动信号，然后通过 remux 和 mux 模块的重新组合得到桥式电路需要的 4 路驱动脉冲，PWM Generator 模块的设置和产生的驱动脉冲信号如图 5-48 所示。PWM Generator 的调制信号采用了外部输入的方式，外部调制信号由 Step 模块产生，通过 Step 模块改变控制信号 U_{ct}来调节变换器输出电压和电流。模型中用 Mean Value 模块来观察输出电压的平均值。

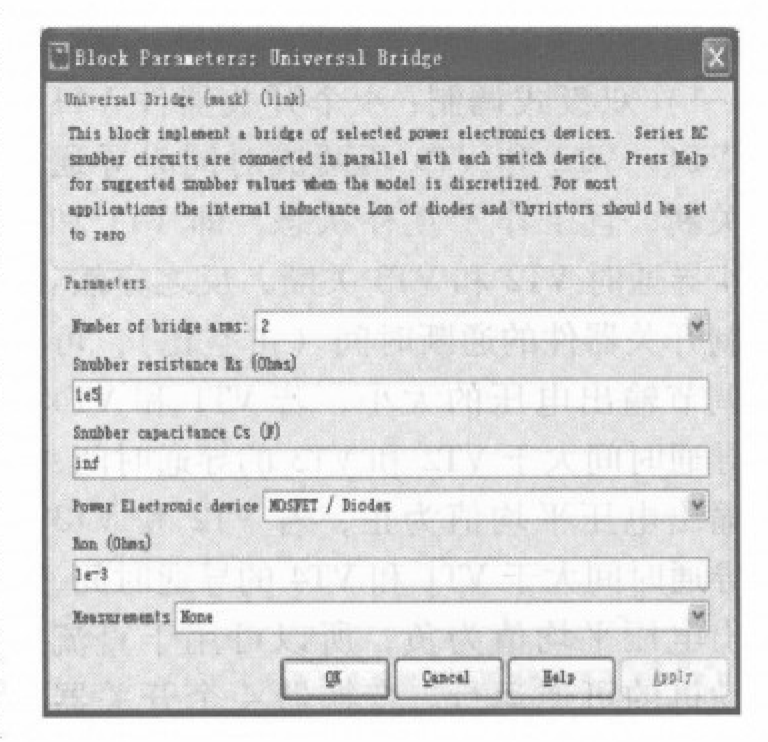
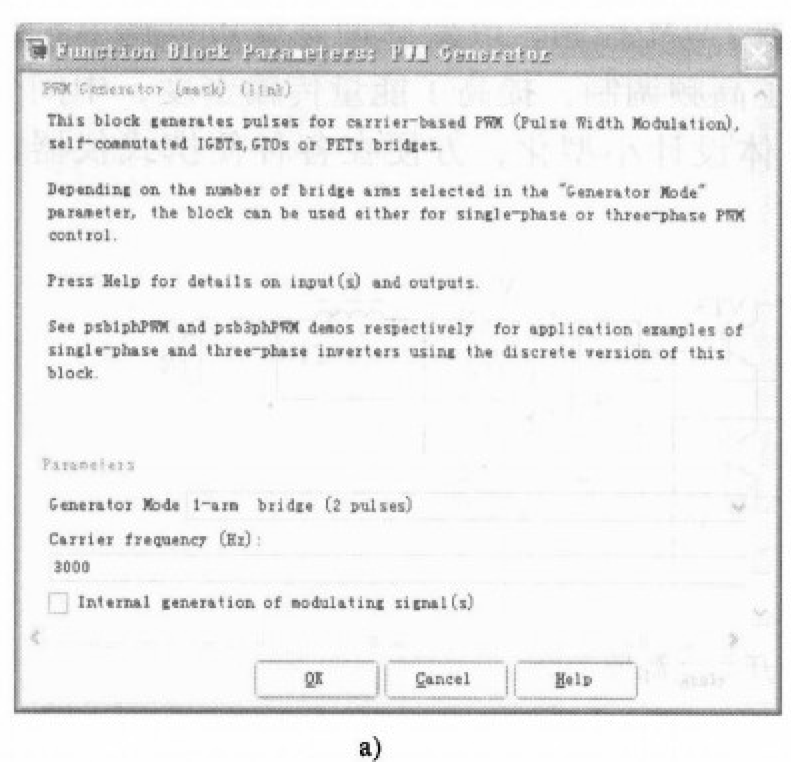


图 5-47　Universal Bridge 模块设置

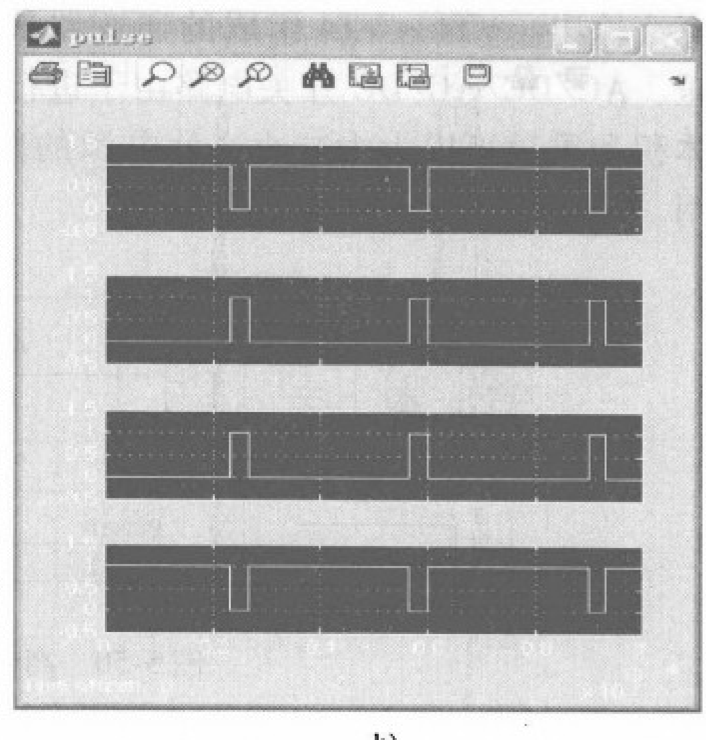
单极式和受限单极式直流变换器的仿真在双极式电路的基础上可以通过修改 remux 和 mux 模块的组合，改变 Universal Bridge 模块的驱动信号来实现。

【例 5-5】 观察 H 型直流调压器的输出电压、电流波形。已知电源电压为 12V，RL 负载，其中 R 为 0.5Ω、L 为 0.5mH。Step 模块设置为 0.01s 时占空比从 0.8 切换为 -0.8，PWM Generator 的调制频率取 3kHZ。仿真参数设置：仿真时间 0.02s，仿真算法 ode23t，计算精度（Relative tolerance）设为 1e-6。

仿真结果如图 5-49 所示，其中图 5-49a 为直流调压器的输出电压波形，在 0.01s 前 PWM 正脉冲宽度大于负脉冲宽度，输出电压平均值为正，0.01s 时控制信号 U_{ct}由 +0.8 切换为 -0.8，输出电压的负脉冲宽度大于正脉冲宽度，输出电压平均值变负，输出电压的变



a)



b)

图 5-48 PWM Generator 参数和驱动脉冲

a) PWM Generator 参数 b) 驱动脉冲

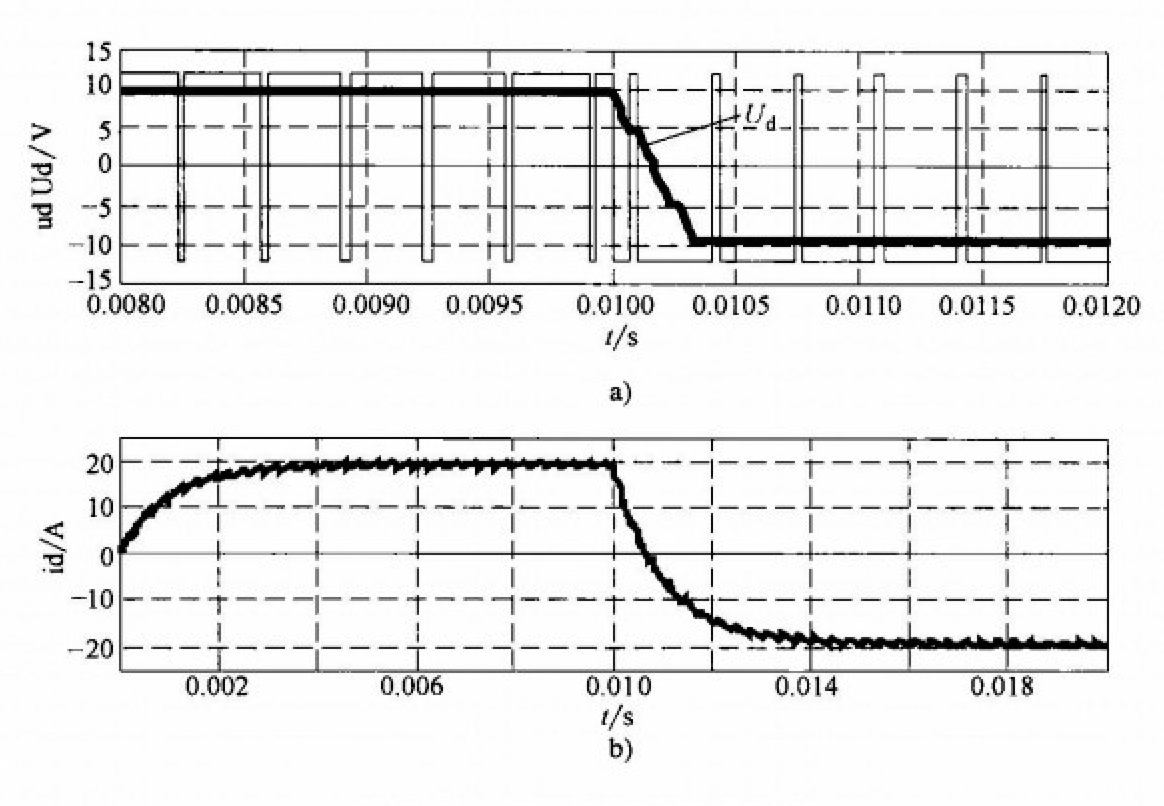


图 5-49 直流斩波器输出波形

a) 输出电压波形 u_d，输出电压平均值 U_d b) 输出电流 i_d

化使输出电流也从正变负（见图 5-49b）。改变占空比可以调节输出电压和电流值，也可以改变仿真参数来观察直流斩波器在各种不同条件下的工作情况。

5.2.5 AC/DC/AC/DC 开关电源的仿真

AC/DC/AC/DC 开关电源是一种组合式变流电路（见图 5-50），它由二极管不控整流电路将三相或单相交流电变换为直流电，开关管 VT1 ~ VT4 组成单相桥式逆变器将直流电变换为几千赫兹 ~ 几十千赫兹的高频交流电，再经高频变压器 T 的变压和隔离，由二极管 VD1、VD2 组成的单相全波整流电路将高频交流整流为直流，并由电感 L 和电容 $C1$ 滤波后得到稳

定的直流输出。VT1～VT4 组成的逆变器采取 PWM 控制，改变脉冲宽度可以调节整流输出电压，AC/DC/AC/DC 开关电路由于进行了高频调制，提高了能量传输密度，中间变压器的体积和重量可以大大减小，使电源的整体设计小型化，方便在各种便携式仪器设备中使用。

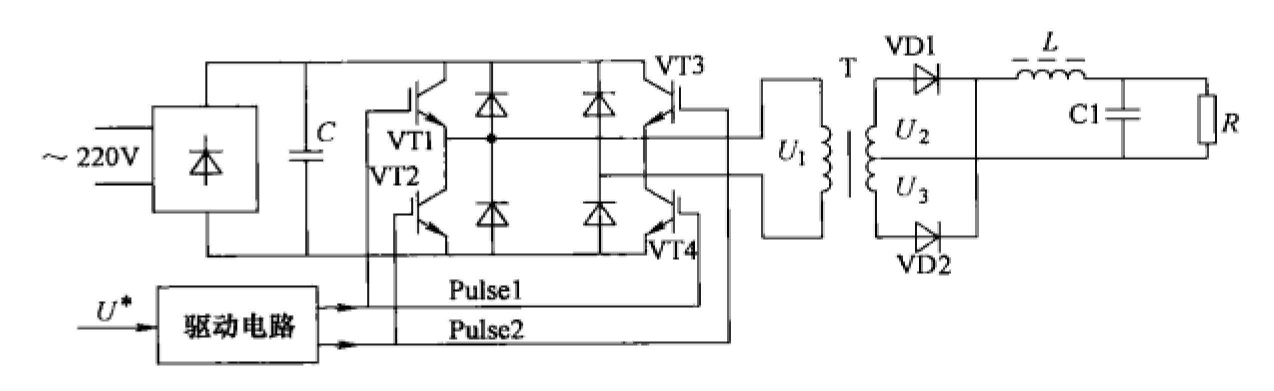


图 5-50　高频开关电源原理图

开关电源的仿真模型如图 5-51 所示，模型中二极管整流和滤波电容电路直接用直流电源代替，以减小模型的复杂性，而 VT1～VT4 组成的逆变器使用了 Universal Bridge 模块。在 SIMULINK 模型库中没有该开关电源相应的驱动模块，因此在模型中使用了两个 PWM Generater 模块来产生驱动脉冲，并通过常数模块 U* 的设定值来调节脉冲宽度，设定值可以在 0～1 之间调节。在第二个 PWM Generator 模块前加放大器 Gain，并取放大倍数为 -1，起信号倒相作用。PWM Generator 模块的参数设置如图 5-52a 所示，得到的 4 路脉冲如图 5-52b 所示，从上向下依次为 VT1～VT4 的驱动脉冲。逆变器和高频变压器的参数如图 5-53 所示，变压器一、二次电压分别取 220V 和 75V，为仿真方便一、二次绕组电感和电阻都取 0，如果考虑一、二次绕组电感和电阻，电压波形将不是良好的矩形波，仿真的时间也较长，其他元器件参数如模型所示。仿真时间取 0.1s，仿真算法为 ode45。仿真得到的电路各部分波形如图 5-54 所示，其中图 5-54a、b 分别为高频变压器一、二次电压波形，经过逆变器后，直流电转变为 8kHz 的高频矩形交流电，变压器一次电压幅值为 220V，二次电压幅值为 75V，与设定相同。图 5-54c 为滤波电感 L 两端的电压波形，图 5-54d 为电阻 R 两端的电

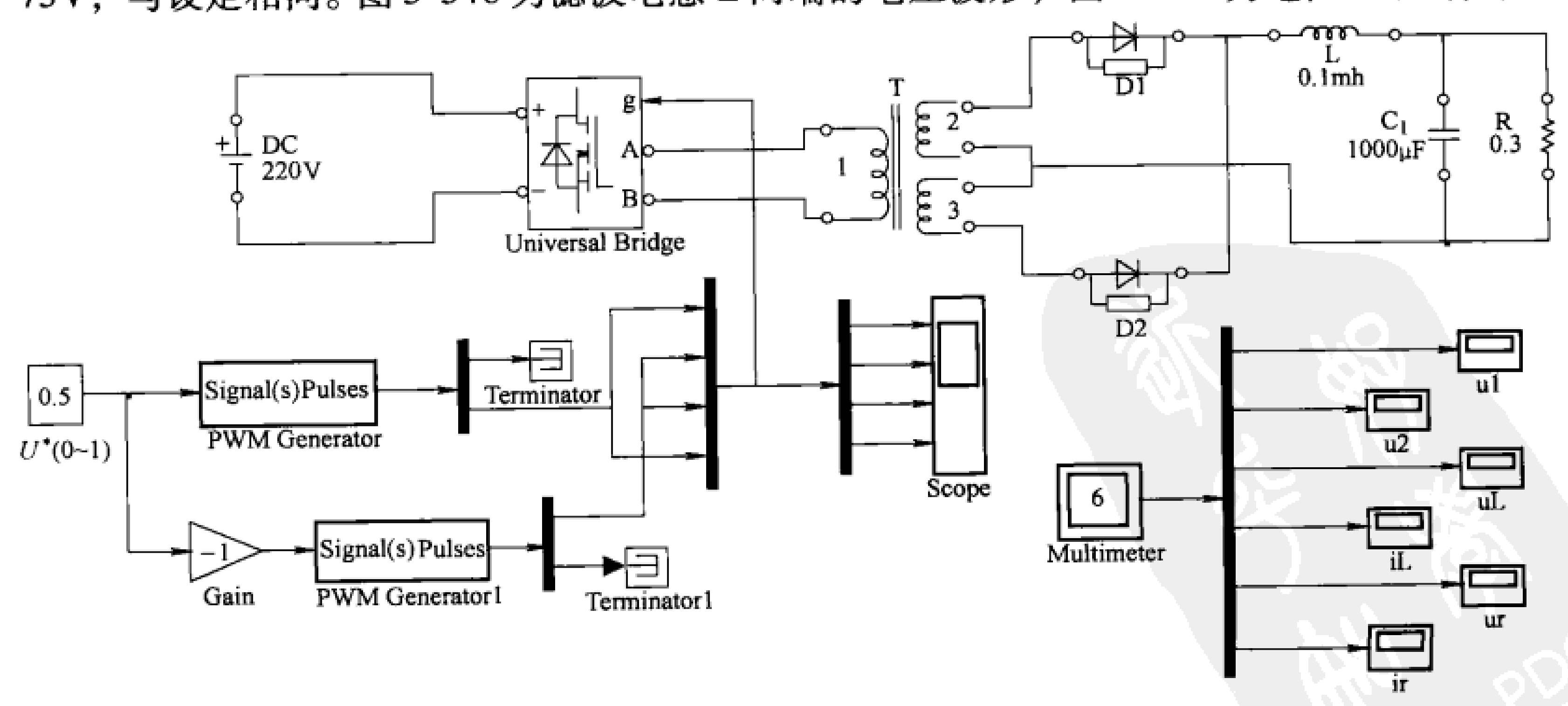
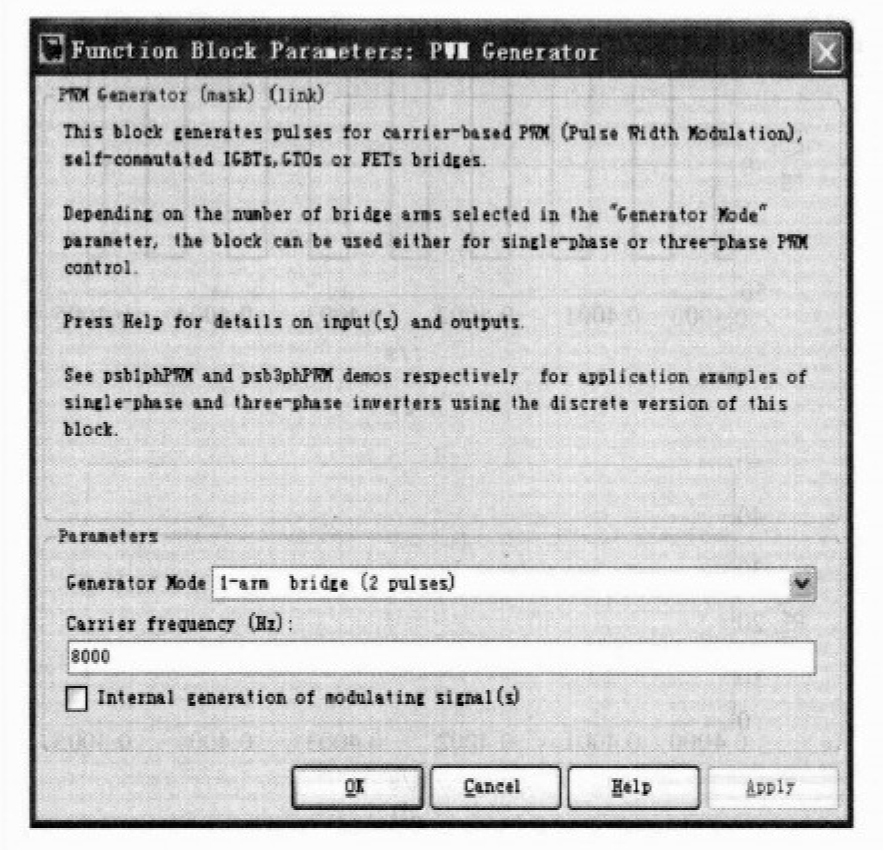
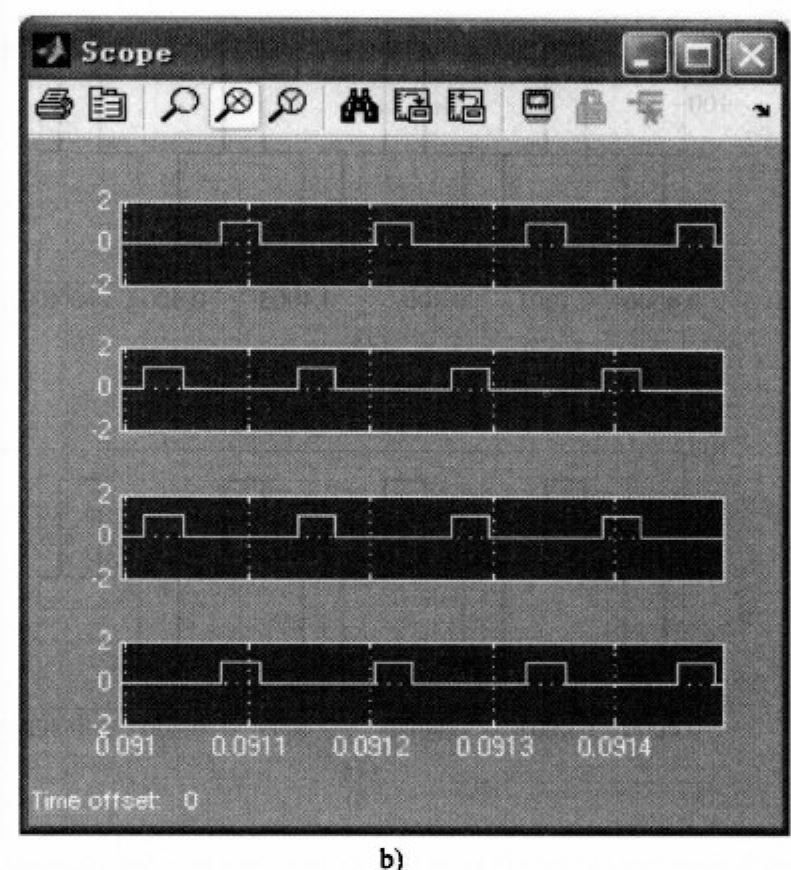


图 5-51　开关电源仿真模型

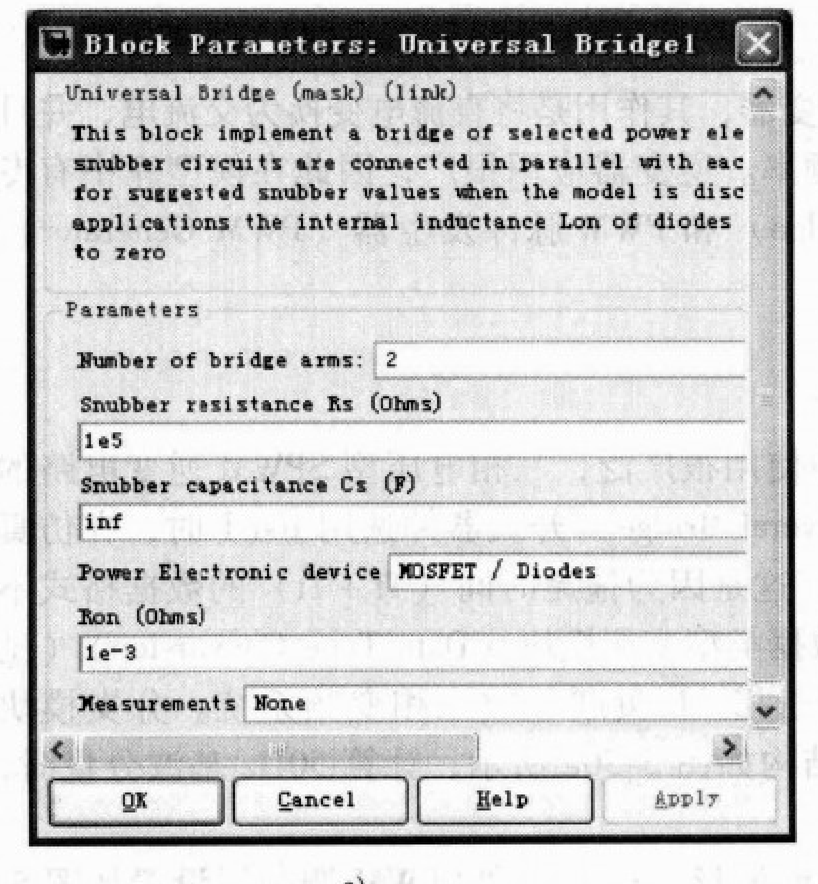


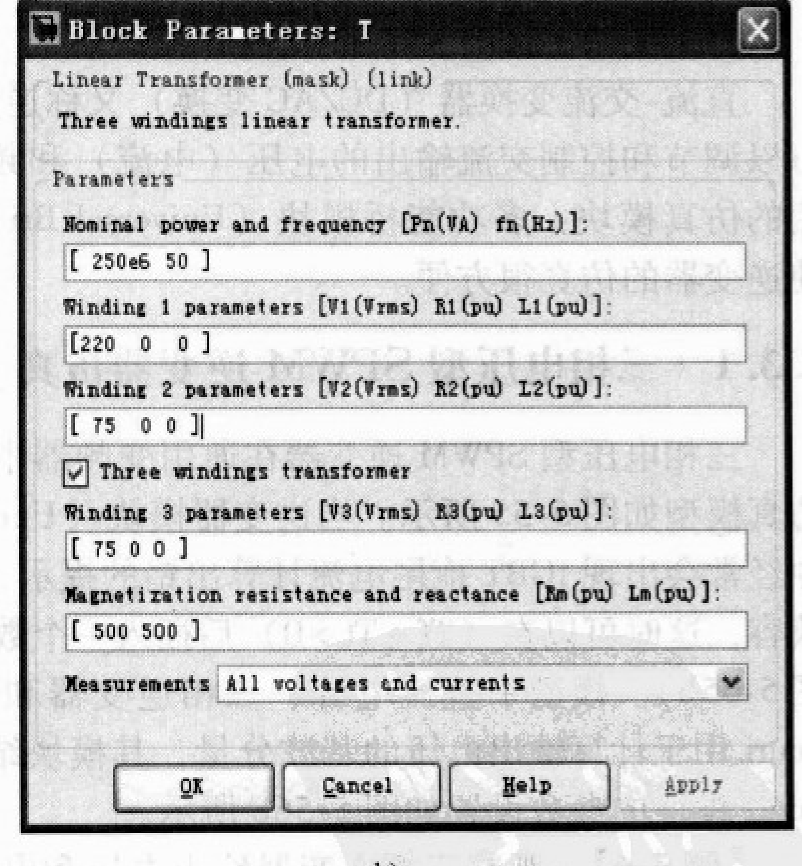


a)　　　　　　　　　　b)

图 5-52　脉冲发生器参数和驱动信号

a）脉冲发生器参数　b）驱动脉冲





a)　　　　　　　　　　b)

图 5-53　逆变器和变压器参数

a）Universal Bridge 参数　b）变压器参数

压，即开关电源的输出电压波形，对该模型做适当改变也可以仿真其他结构相近的开关电源电路。

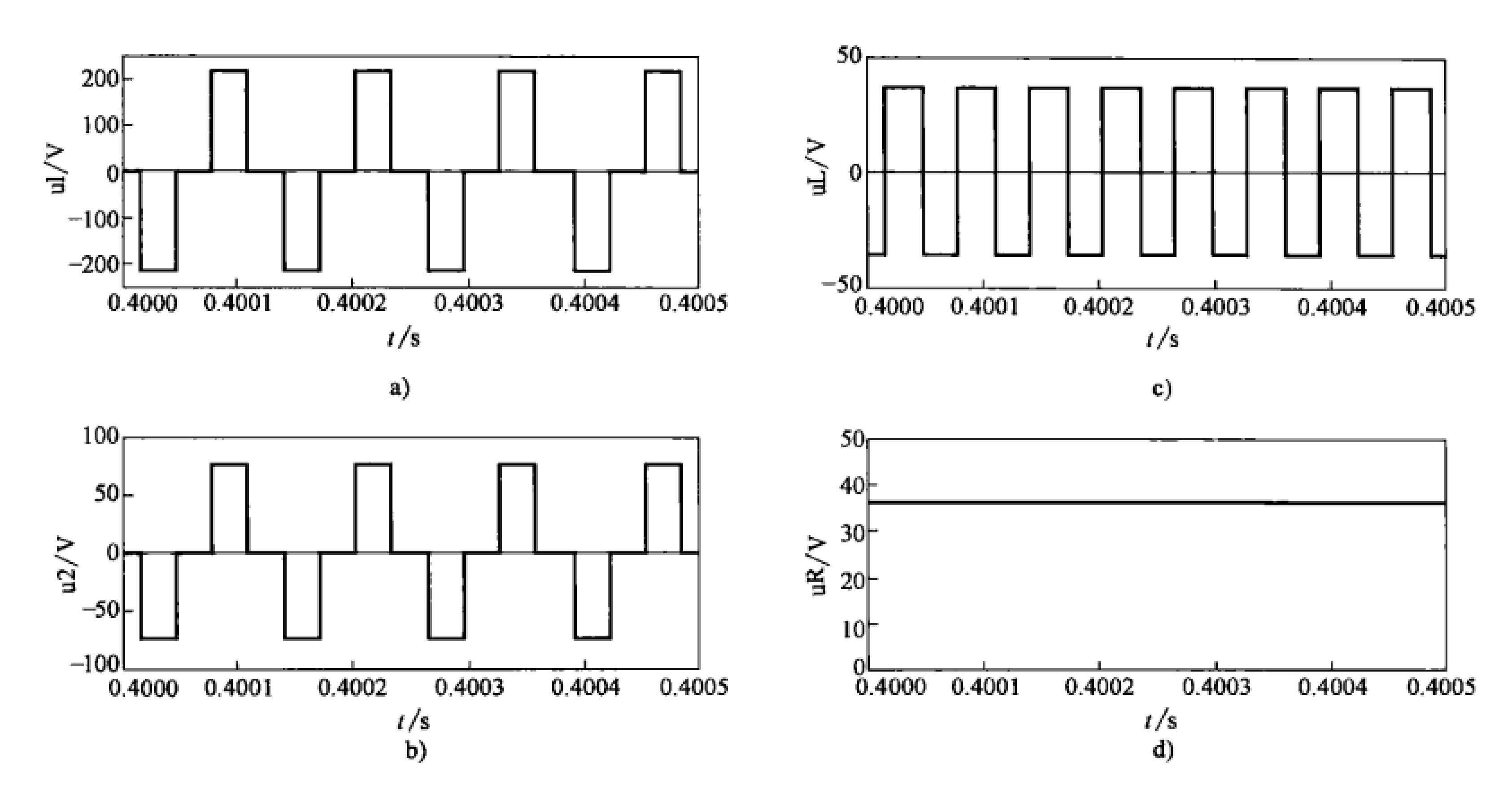


图 5-54 开关电源主要波形

a）变压器一次电压 b）变压器二次电压 c）滤波电感 L 电压 d）负载电阻 R 电压

5.3 直流-交流变换器

直流-交流变换器（DC/AC 变换）又称逆变器，其作用是将直流电变换为交流电，并且可以调节和控制交流输出的电压（电流）和频率。逆变器应用很广，因此在模型库中有专用的仿真模块：多功能桥模块（Universal Bridge）和 PWM 脉冲发生器（PWM Generator），使逆变器的仿真很方便。

5.3.1 三相电压型 SPWM 逆变器仿真

三相电压型 SPWM 逆变器在通用变频器中使用很广泛，三相电压型 SPWM 逆变电路的仿真模型如图 5-55 所示。当逆变器模块（Univeral Bridge）开关器件选用 IGBT 时，在仿真中经常会出现 IGBT 拖尾电流计算出错的提示，这是因为拖尾时间（Tf + Tt）的数据格式不兼容，这时可以在（Tf + Tt > 0）后插入一个数据类型变换模块（Data Type Conversion）（见图 5-55b）。模型中直流电源、三相逆变器和三相 RL 负载组成三相变频系统。分支模块 Fouri 用于计算输出电压的基波分量，其模块结构如图 5-56a 所示，计算 50Hz 基波分量时，Fouri 模块的参数设置如图 5-56b 所示。

【例 5-6】 观察三相逆变器输出电压和电流波形。逆变器和 SPWM 调制器设置如图 5-57 所示。PWM 调制采用内部产生正弦调制波方式，调制度为 0.9，频率 50Hz。直流电源电压 500V，三相负载 R 值为 0.5Ω，L 值为 1mH，仿真算法为 ode，为了观察输出电压的基波分量，设计了一个基波计算分支模块，分支模块（见图 5-56a）中，用 Fourier 模块分析输出电压波形的基波幅值和相位，然后用 Fcn 模块计算基波分量：

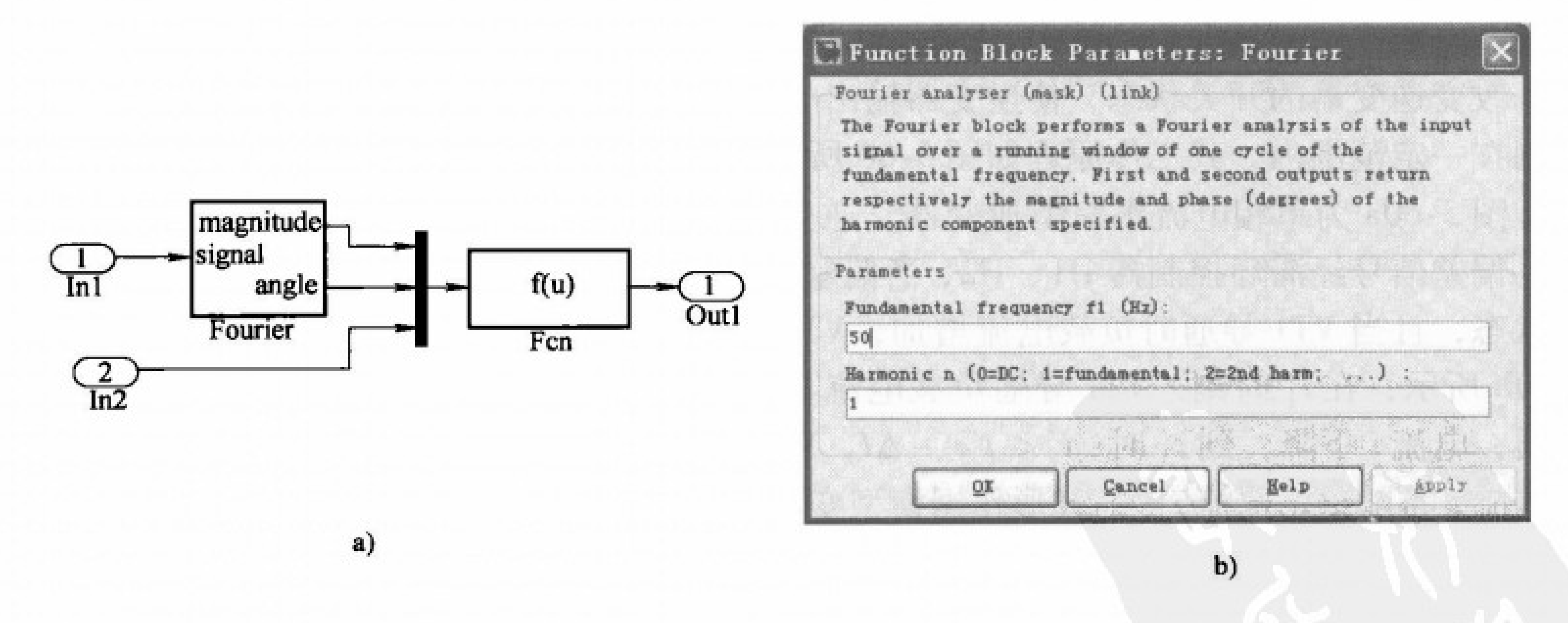
$$Fcn = u_{\text{Bas}} = u[1] \times \sin(2 \times pi \times 50 \times u[3] + pi \times u[2]/180)$$

a)

b)

图 5-55　三相 SPWM 逆变器仿真模型

a）三相 SPWM 逆变器仿真模型　b）IGBT 模型修改



a)

b)

图 5-56　基波分量计算

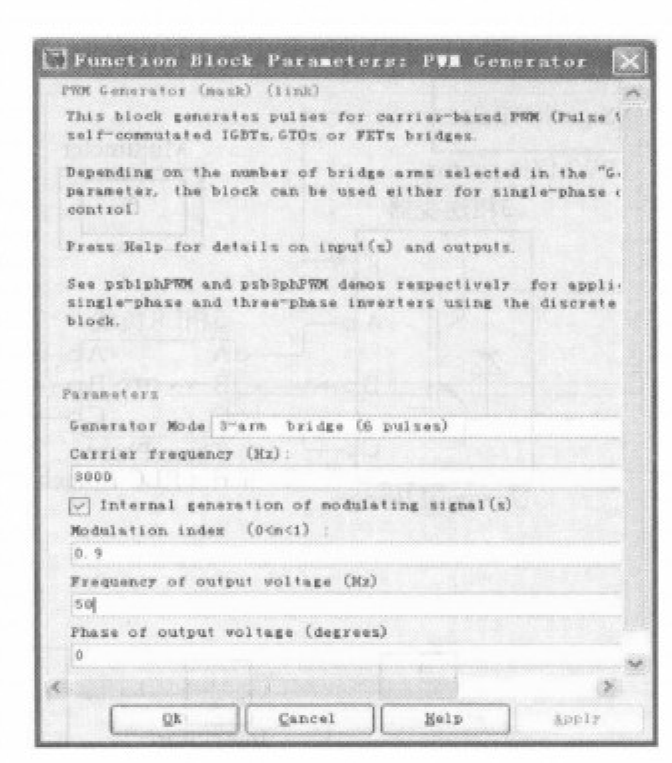
a）基波计算模块　b）Fourier 模块参数

式中，$u[1]$ 为基波幅值；$u[2]$ 为基波相位（°）；$u[3]$ 为时间 t。

图 5-58a ~ c 为逆变器输出的三相相电压波形，图中粗实线为计算得到的基波分量图，5-58d为逆变器输出三相电流波形，图 5-59a 为 IGBT 两端承受的电压，图 5-59b 为逆变器 A

Block Parameters: Universal Bridge
Universal Bridge (mask) (link)
This block implement a bridge of selected power electroı snubber circuits are connected in parallel with each swi for suggested snubber values when the model is discreti: applications the internal inductance Lon of diodes and t to zero
Parameters
Number of bridge arms: 3
Snubber resistance Rs (Ohms)
1e5
Snubber capacitance Cs (F)
inf
Power Electronic device IGBT / Diodes
Ron (Ohms)
1e-3
Forward voltages [Device Vf(V) , Diode Vfd(V)]
[0 0]
[Tf (s) , Tt (s)]
[1e-6 , 2e-6]
Measurements All voltages and currents
OK Cancel Help Apply

a)



b)

图 5-57 逆变器和调制器模块设置
a）逆变器参数 b）PWM 调制器参数

相上桥臂 IGBT（VT1）和与 IGBT 反并联的二极管（VD1）的电流，通过多功能模块观察的电流波形为一相桥臂的电流，该电流包含 IGBT 和二极管的电流两部分，因此该电流的正向部分是通过 IGBT 的电流，反向部分为二极管的电流，因为是电感负载，该电流滞后于电压。通过 IGBT 的电压和电流，并加上一定的裕量可以选择 IGBT 的电压和电流参数。

5.3.2 电流跟踪型逆变器仿真

电流跟踪型逆变器使逆变器输出电流跟随给定的电流波形变化，这也是一种 PWM 控制方式。电流跟踪一般都采用滞环控制，即当逆变器输出电流与给定电流的偏差超过一定值时，改变逆变器的开关状态，使逆变器输出电流增加或减小，将输出电流与给定电流的偏差控制在一定范围内，其工作原理如图 5-60 所示。

图 5-60a 为单相电流跟踪型逆变器，逆变器通过检测负载电流 i，并与给定电流 $i*$ 比较，偏差信号经滞环控制器 H1、H2，当偏差超过滞环控制器的环宽 ΔI 时，则改变逆变器开关状态，且当 VT1 导通时负载电流增加，VT2 导通时电流下降。跟踪控制电流的波形如图 5-60b 所示，在 t_1 时刻，VT1 导通负载电流 i 增加，到 t_2 时，$i > i* + \Delta I$，VT1 关断，VT2 导通，电流 i 下降，到 t_3 时，$i < i* - \Delta I$，VT2 关断，VT1 导通。如此周而复始，逆变器输出电流 i 将随给定电流 $i*$ 的波形作锯齿型变化，而滞环控制器的环宽 ΔI 则决定了锯齿型变化的范围，ΔI 较小，逆变器输出电流跟踪给定的效果更好，但是逆变器的开关频率将提高，开关的损耗也更大。在跟踪型逆变器中，选择适当的环宽是很重要的。

1. 单相跟踪控制逆变器的仿真

按图 5-60 原理设计的单相跟踪控制逆变器仿真模型如图 5-61 所示，图中 Universal Bridge 模块参数设置如图 5-62a 所示，桥臂数选择“1”，选择开关器件为 IGBT/Diodes；图 5-62b 和图 5-62c 分别为滞环控制器（Relay1，2）模块的参数，模块中滞环宽度取值左右不等，是为留有桥臂上下开关交替导通时的“死区”，避免换流时的直通现象，其他参数见表

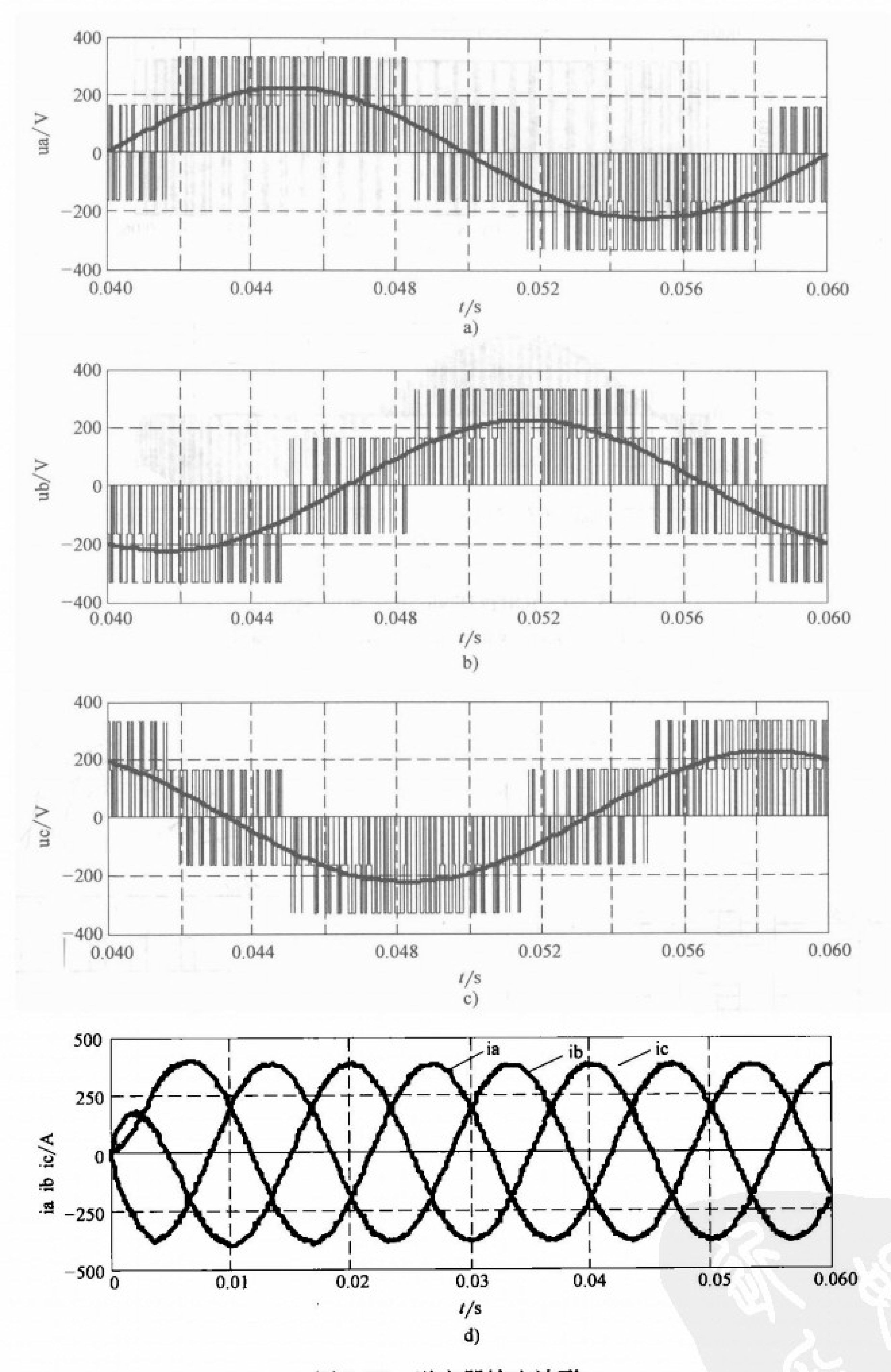


图 5-58　逆变器输出波形

a）输出电压（A 相）　b）输出电压（B 相）　c）输出电压（C 相）　d）三相输出电流

5-4。仿真采用 ode15s 算法，仿真的结果如图 5-63 所示，其中图 5-63a 为给定的正弦电流，图 5-63b 为逆变器输出电流波形，比较图 5-62a 和图 5-62b 可知，逆变器输出电流波形很好地跟踪了电流的给定变化，调整环宽，电流输出与给定之间的偏差也随着变化，环宽越小，

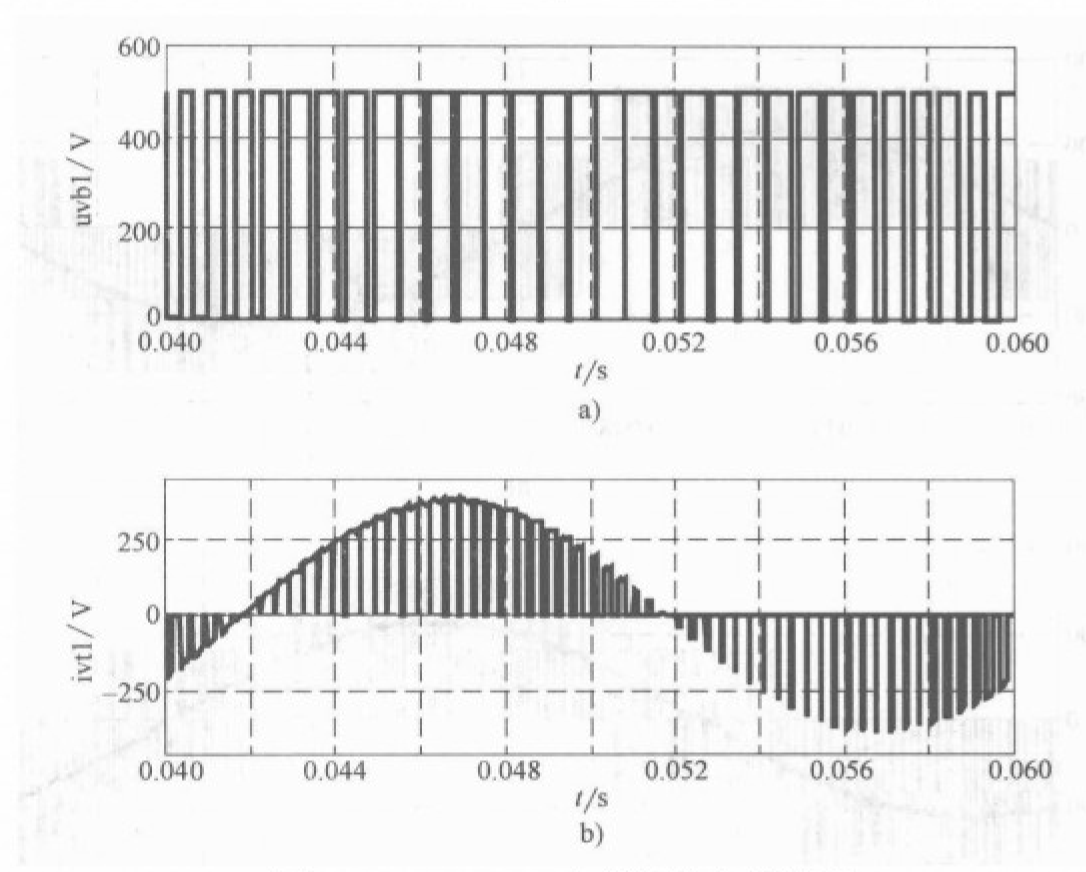


图 5-59 IGBT/Diode 电压和电流波形

a) IGBT/Diode 两端电压 b) IGBT/Diode 电流

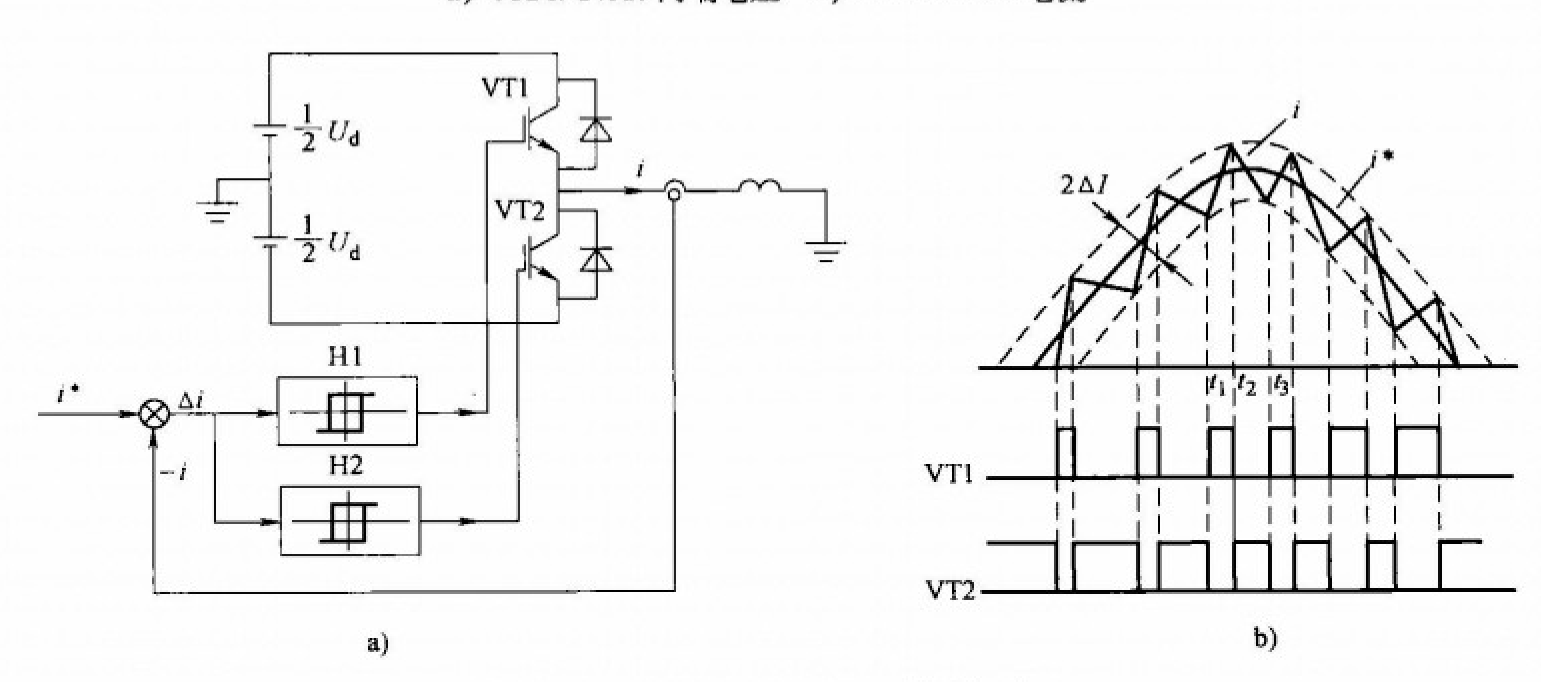


图 5-60 单相电流跟踪型逆变器原理

a) 原理图 b) 驱动脉冲

逆变器开关的频率越高，开关损耗将增加，在环宽调整时，有时也需要改变仿真的算法。图 5-63c、d 分别是输出电流和电压波形的局部放大，从电压波形可以看到，逆变器属于电压源型 PWM 控制，并且电流跟踪的效果还与 RL 负载的取值有关。

表 5-4 跟踪控制逆变器模型参数

模 块	参 数 名	参 数 值
直流电源 DC1,DC2	Amplitude/V	100
阻感模块 RL	Resistance/Ω	0.5
	Inductance/H	0.5e-3
正弦波模块 sine wave	Amplitude	20
	Frequence/(rad/s)	2 * pi * 50

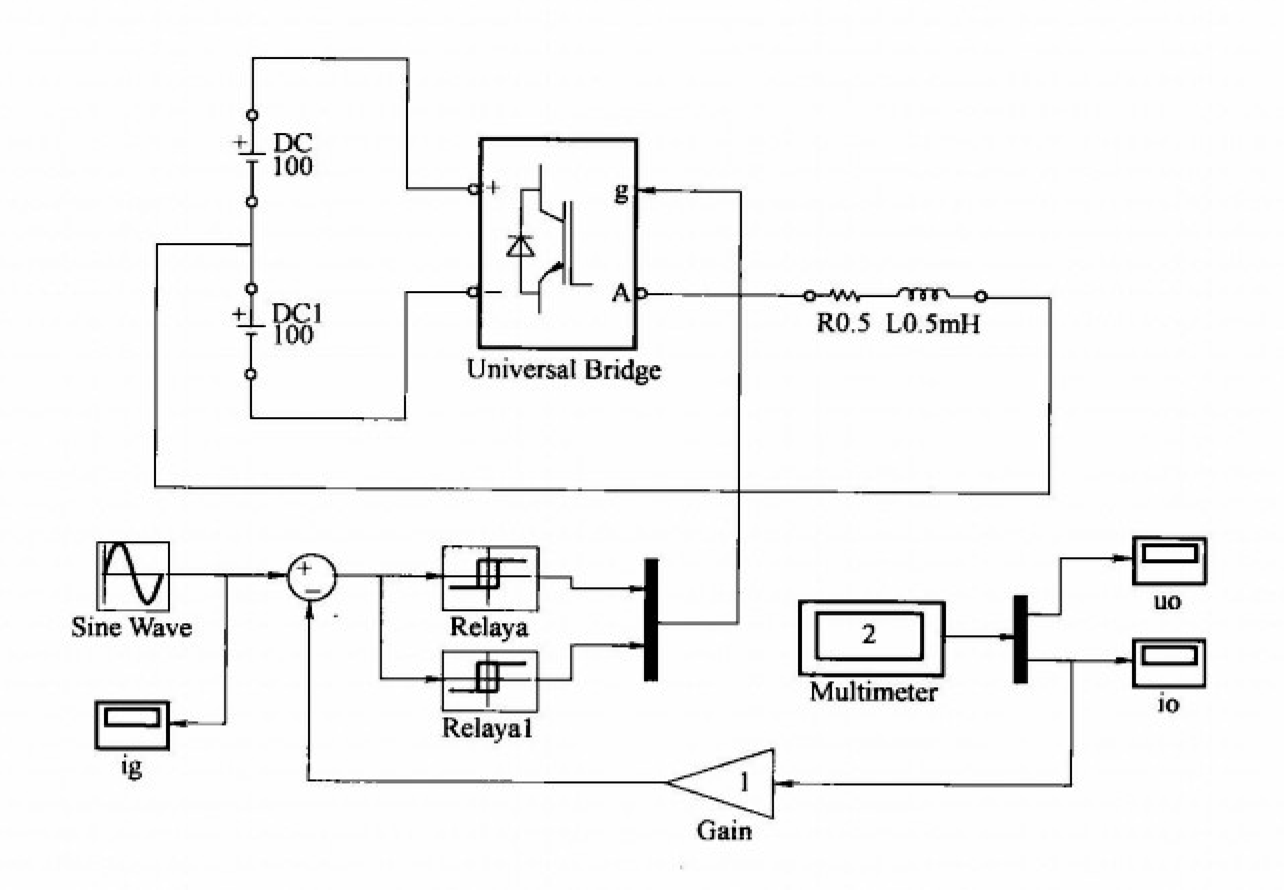


图 5-61　单相跟踪控制逆变器仿真模型

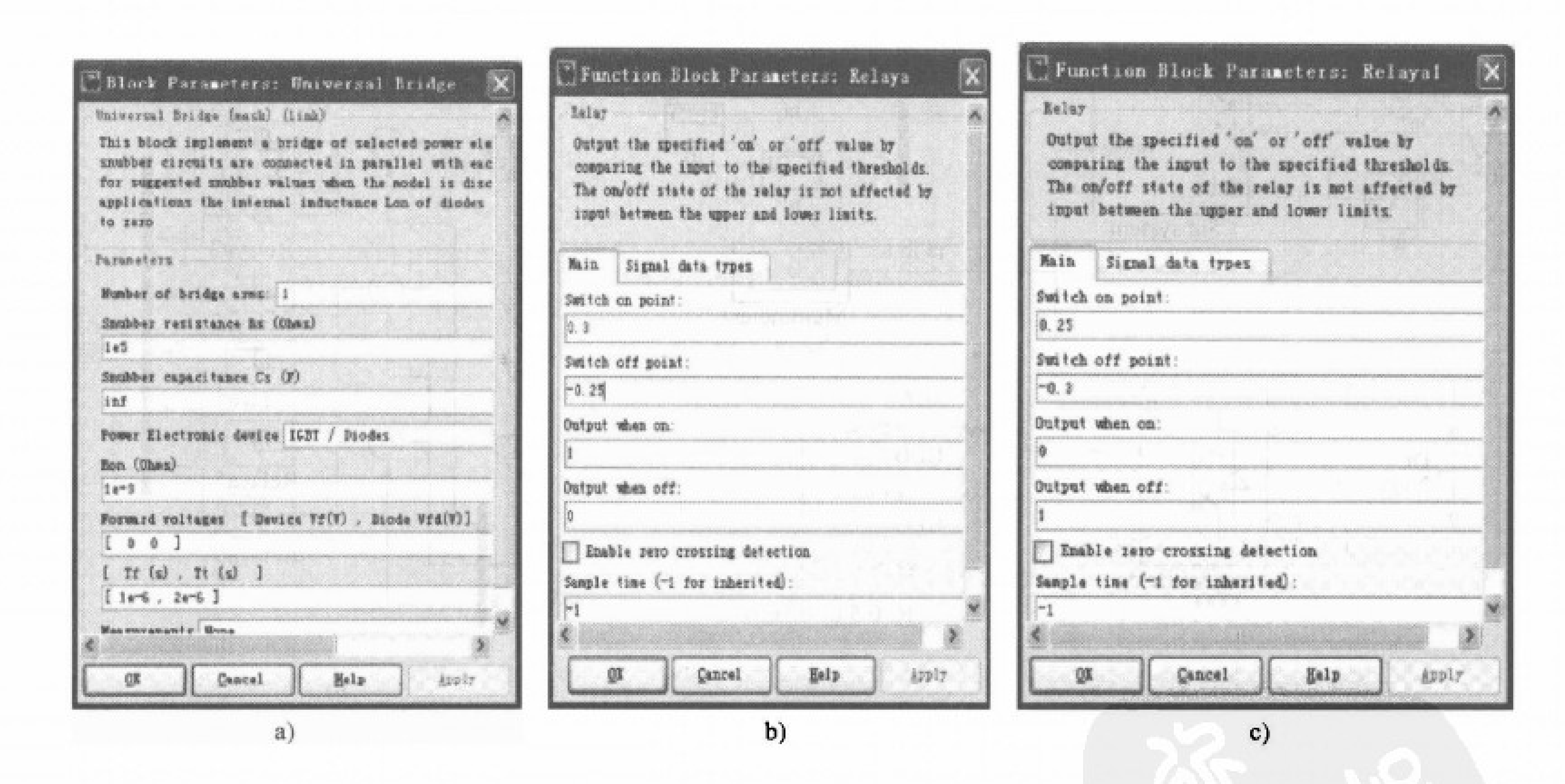


图 5-62　跟踪控制逆变器模型参数

a）逆变器参数设置　b）滞环控制 H1 参数　c）滞环控制 H2 参数

2. 三相电流跟踪逆变器仿真

三相电流跟踪逆变器由三组单相电流跟踪逆变器组成，其仿真模型如图 5-64a 所示，其中滞环控制器（Subsystem）由三个单相电流滞环控制器打包组成，其结构如图 5-64b 所示。三相负载 $R=0.5\Omega$，$L=0.5\text{mH}$，直流电压 $DC=200V$。三相负载电流由多路测量仪（Multimeter）观测，三相电流跟踪逆变器的电流波形如图 5-65 所示。

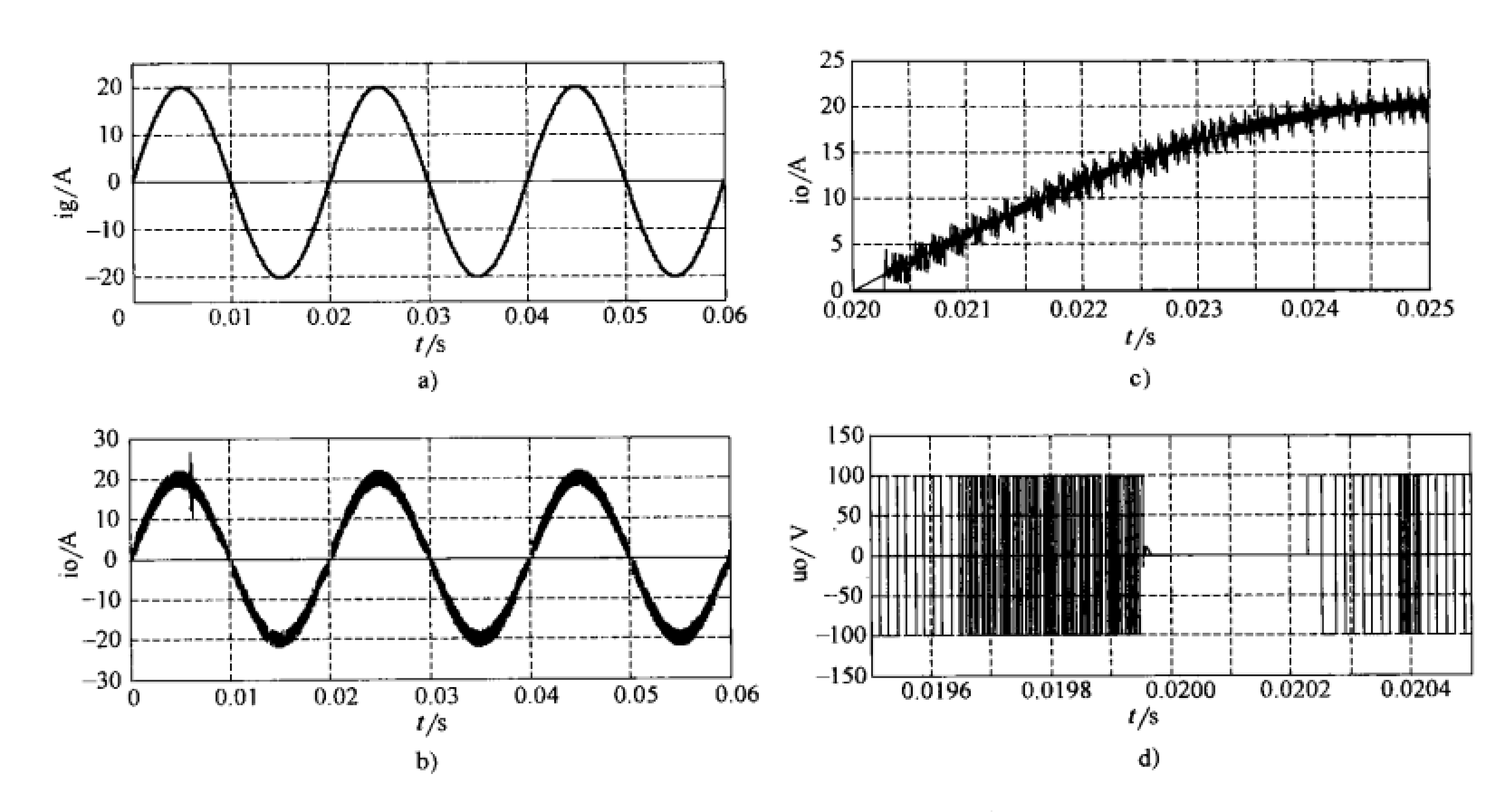


图 5-63 单相电流滞环控制器仿真波形

a）电流给定值 b）输出电流 c）输出电流（1/4 周期） d）输出电压（局部）

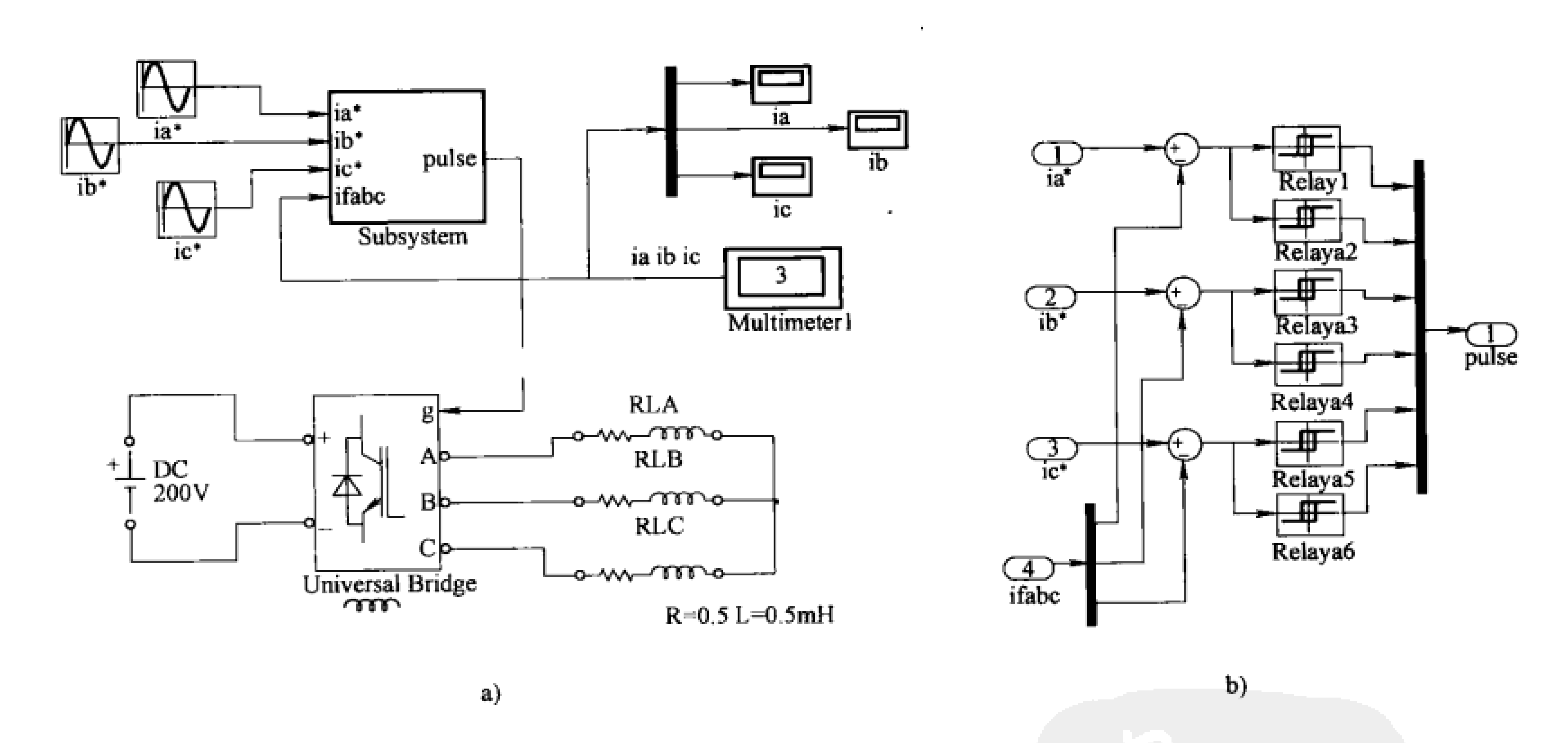


图 5-64 三相电流滞环控制变流器

a）仿真模型 b）滞环控制器分支电路

5.4 交流-交流变换器

交-交变换（AC-AC）包括交流调压和交-交变频。交流调压是指不改变交流电压的频率而只调节电压的大小的方法。过去交流调压使用变压器，在电力电子技术出现后，采用电力电子器件的交流调压器不仅可以对电压进行连续调节，并且体积小、重量轻、控制灵活方

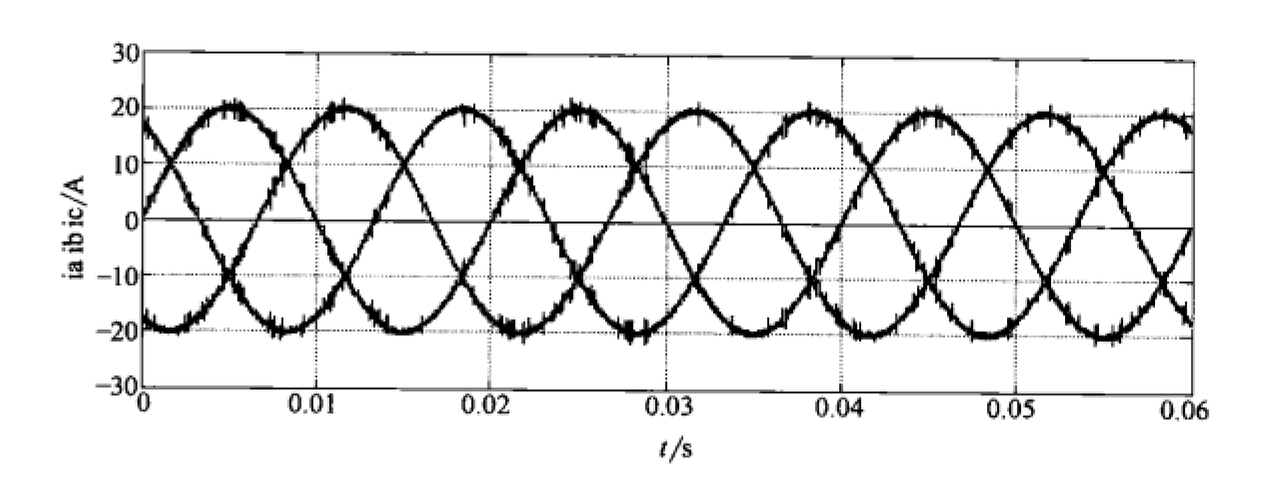


图 5-65　三相电流跟踪逆变器电流波形

便，在灯光控制、家用风扇调速、交流电机的调压调速和软起动以及交流电机的轻载节能运行中得到了广泛的应用。交-交变频是通过电力电子电路的开关控制将工频三相交流电直接转换为其他频率的单相或三相交流电，也称直接变频器和周波变流器，一般交-交变频器在改变频率的同时也调节电压的大小，即实现 VVVF 控制。

5.4.1　单相交流调压器仿真

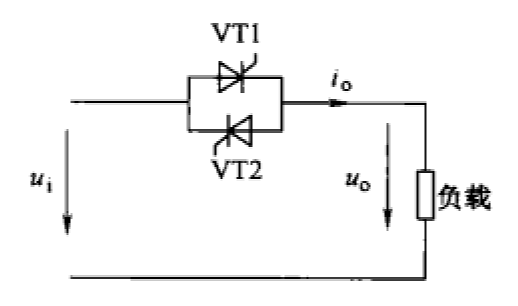


图 5-66　单相交流调压电路

交流调压电路有采用晶闸管器件的相位控制和采用全控器件的 PWM 控制两种方式，这里主要介绍晶闸管控制的交流调压电路。PWM 控制的交流调压仿真在前节介绍的直流-直流变换仿真基础上很容易实现。

由晶闸管控制的单相交流调压电路如图 5-66 所示，反并联连接的晶闸管 VT1 和 VT2 组成了交流双向开关，在交流输入电压的正半周，VT1 导通，在交流输入电压的负半周，VT2 导通，控制晶闸管的导通时刻，可以调节负载两端的电压。

单相交流调压电路的仿真模型如图 5-67 所示。模型由交流电源、反并联晶闸管模块 VT1，2、触发模块 pulse1，2、阻感负载 RL 和观测示波器组成。其中双向晶闸管开关模块由分支电路组成（见图 5-68），分支电路的 A1 和 A2 端分别是晶闸管双向开关的输入和输出端，g1 和 g2 分别是晶闸管 VT1 和 VT2 的触发端，m 端用于观测晶闸管 VT1 两端的电压和电流。

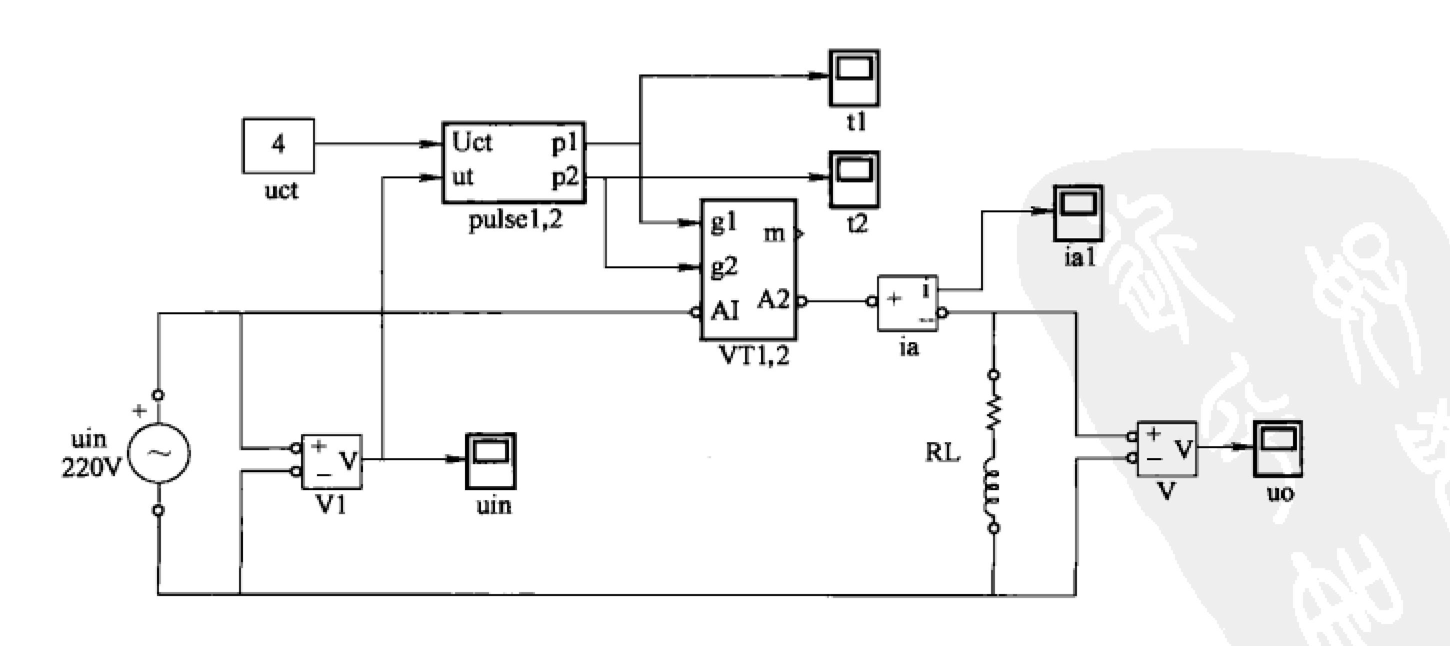


图 5-67　单相交流调压电路仿真模型

图 5-68 反并联晶闸管分支电路

交流调压晶闸管控制角 α 的移相范围是 180°，$\alpha=0°$的位置定在电源电压过零的时刻。在阻感负载时，按控制角与负载阻抗角（$\varphi=\arctan(L/R)$）的关系，电路有两种工作状态：

1）$\varphi\leqslant\alpha\leqslant180°$时，调压器输出电压和电流的正负半周是不连续的，在这个范围内调节控制角，负载的电压和电流将随之变化。

2）$0°\leqslant\alpha\leqslant\varphi$ 时，调压器输出处于失控状态，即虽然控制角变化，但负载电压不变，且是与电源电压相同的完整正弦波。这是因为阻感负载电流滞后于电压，因此如果控制角较小，在一个晶闸管电流尚未下降到零前，另一个晶闸管可能已经触发（但不能导通），一旦电流下降到零，如果另一个晶闸管的触发脉冲还存在，则该晶闸管立即导通，使负载上电压成为连续的正弦波，出现失控现象。正因为如此，交流调压器晶闸管必须采用后沿固定在 180°的宽脉冲触发方式，以保证晶闸管能正常触发。根据以上要求设计的交流调压器触发电路如图 5-69a 所示。

交流调压器的触发电路（pulse1，2）由同步、锯齿波形成和移相控制等环节组成。电路的输入 ut 是同步电压输入端，同步电压经延迟（Relay）环节产生与同步电压正半周等宽的方波，该方波经斜率设定（Rate Limiter）产生锯齿波，锯齿波与移相控制电压（输入端 Uct）叠加，调节锯齿波的过零点，再经延迟（Relay1），产生前沿可调、后沿固定的晶闸管触发脉冲，触发电路各部分的输出波形如图 5-69b 所示。波形从上至下分别为：同步信号、180°等宽方波、锯齿波、叠加移相控叠信号和触发脉冲，触发电路的下半部分用于产生负半周晶闸管的触发脉冲。

【例 5-7】 观察交流调压器在 $\alpha\geqslant\varphi$ 和 $\alpha\leqslant\varphi$ 两种情况下输出电压和电流的波形，负载 R 值为 1Ω，L 值为 10mH。

仿真步骤：1）按图 5-67 绘作交流调压器仿真模型。

2）设置模块参数，见表 5-5，移相控制电压 uct 可在 0 ~ 10V 之间任意调节。

3）设置仿真参数：仿真时间 0.04s，仿真算法 ode15s。

表 5-5 交流调压器主要参数设置

模块	电源 uin	Relay1、Relay2		Rate Limiter、Rate Limiter1		Relay1、Relay3	
参数设置	220V	Switch on point	eps	Rising slew rate	1000	Switch on point	eps
	50Hz	Switch off point	eps	Fallingslew rate	-1e8	Switch off point	eps
		Output when on	10			Output when on	1
		Output when off	0			Output when off	0

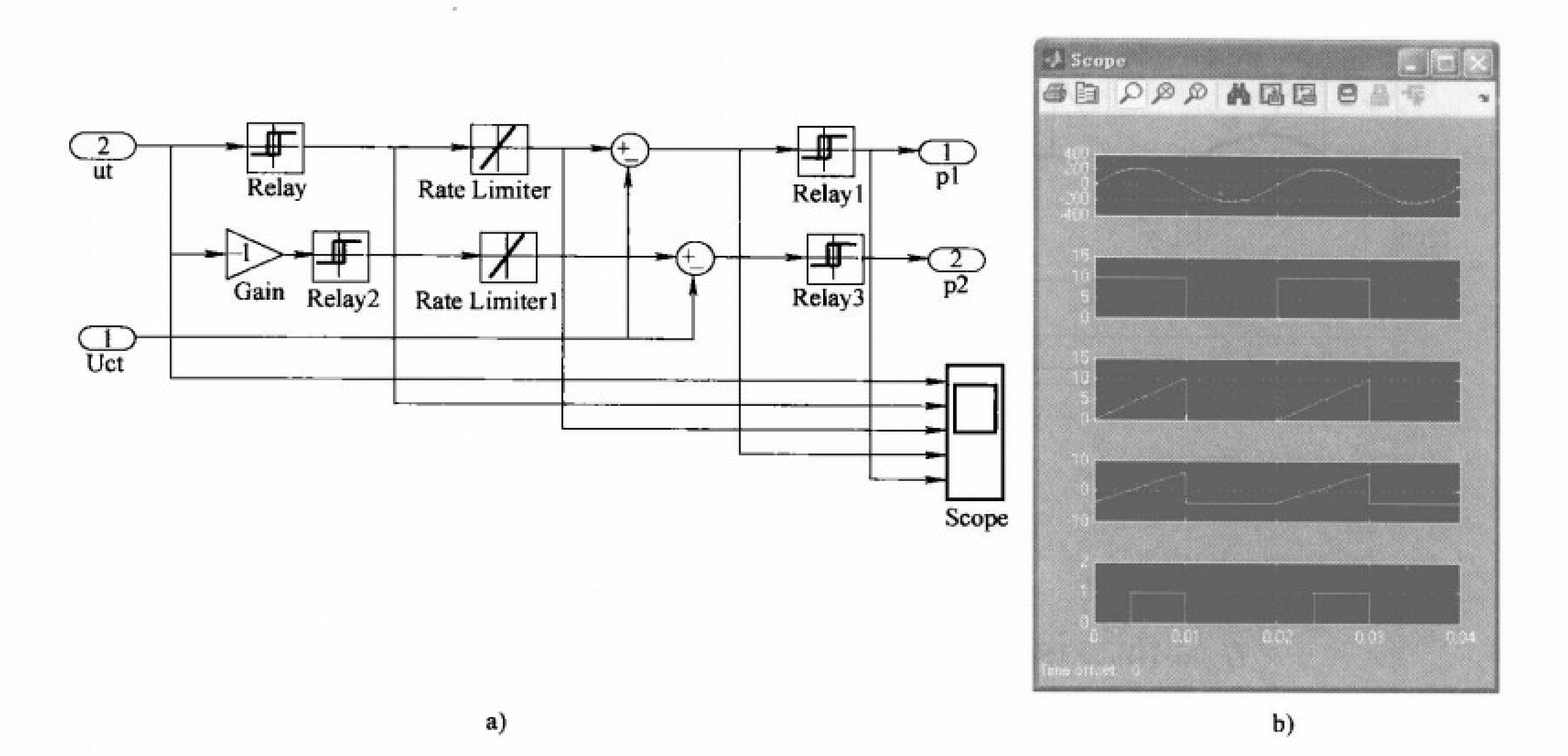


图 5-69　交流调压器触发电路和波形
a）触发电路 pulse1，2 模块　b）波形

4）启动仿真，仿真结果如图 5-70 所示。其中图 5-70a 为移相控制电压Uct = 5V 时的调压器输出电压、电流波形。由于晶闸管的斩波作用并且控制角较大，输出电压、电流波形的正负半周是不连续的，使输出电压有效值减小，实现了对交流电压的调节。图 5-70b 为 Uct 为 2V 时调压器的输出电压、电流波形，由于控制角较小（$0° \leqslant \alpha \leqslant \varphi$），输出电压和电流为完整的正弦波，交流调压器失去调压控制作用。比较电流和晶闸管的触发脉冲，可以看到，在正向电流尚未为零前，反向晶闸管的触发脉冲已经到来，如果触发脉冲很窄，在正向电流到零时，反向晶闸管的触发脉冲已经消失，则反向晶闸管就不能导通，因此需要采用宽脉冲触发方式，且脉冲的后沿应设在 180°的位置，和交流调压器的移相范围相适应。在电流的第一个周期，因为电感电流较大，电感储能较多，正向晶闸管的导通时间较长，使反向晶闸管的实际导通时间滞后于触发时间，因此电流的正半周大于负半周，经 2 个周期的调节，达到正负半周相等的平衡状态。图中方波为正反向晶闸管的触发脉冲。

5.4.2　三相交流调压电路仿真

三相交流调压器有星形联结和三角形联结的多种方案。其中星形联结又有无中线和有中线两种电路，三角形联结有线路控制、支路控制和中点控制的不同电路。这里主要研究两种常用的无中线星形联结和支路控制三角形联结电路。

1. 无中线星形联结三相交流调压器

无中线星形联结三相交流调压器的原理电路如图 5-71 所示，其仿真电路如图 5-72 所示。该模型实际上由三个单相交流调压电路组成，图中 VT1，2、VT3，4 和 VT5，6 分别为双向晶闸管开关模块，pulse1，2、pulse3，4 和 pulse5，6 是相应晶闸管的触发模块，双向晶闸管开关模块和触发模块结构均与单相交流调压的模型相同。为了观察方便，在触发模块的移相控制输入端接入了一个控制角与移相控制电压 U_{ct}的变化函数

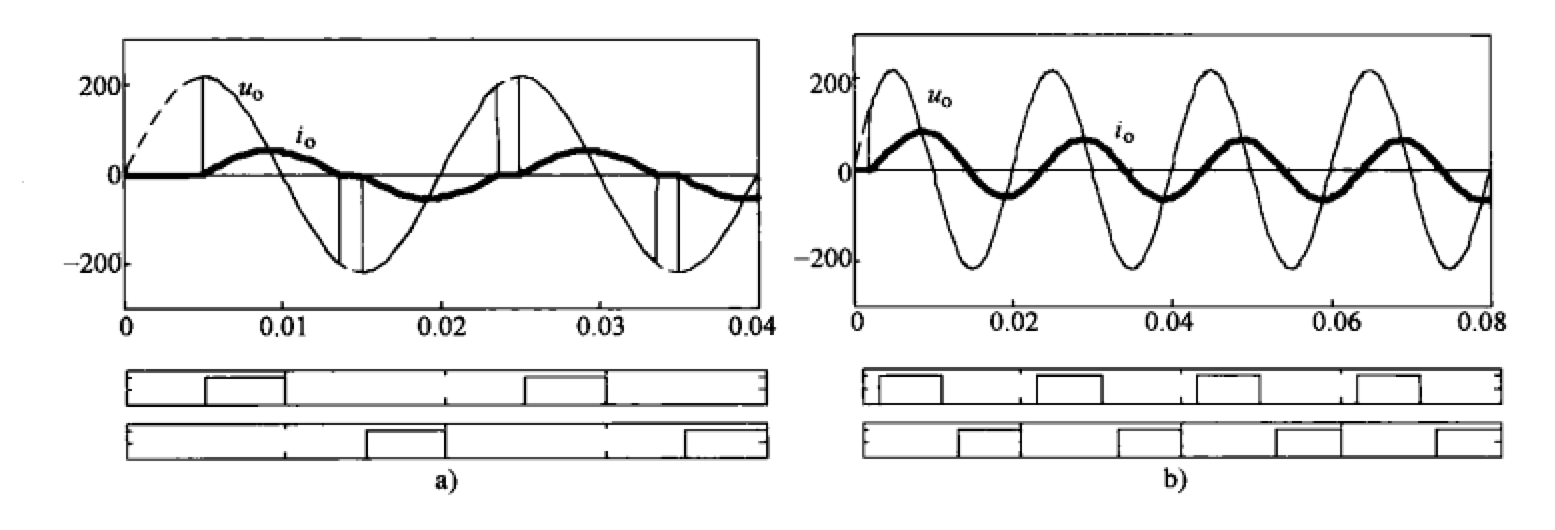


图 5-70　单相交流调压器仿真波形

a）$U_{ct}=5V$　b）$U_{ct}=2V$

$$U_{ct}=10u_1/180$$

式中，u_1 为控制角（度），由常数模块@设定。

在电阻负载时，三相交流调压器的输出电压仿真结果如图 5-73 所示。其中图 5-73a 为 $\alpha=30°$ 时调压器三相输出电压波形，图 5-73b 为 $\alpha=60°$时调压器三相输出电压波形，为了比较方便，图中以虚线给出了对应的电源相电压波形。从 $\alpha=30°$ 的三相波形中可以看到，在调压器三相的各相中都有一个晶闸管导通的区间，输出电压与电源相电压相

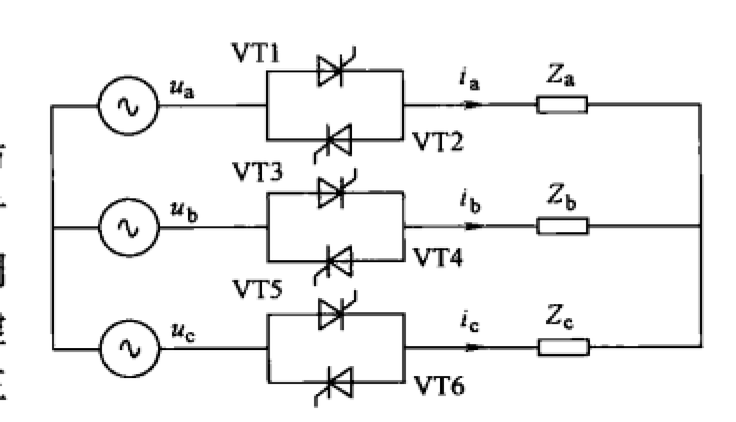


图 5-71　无中线星形联结三相交流调压器

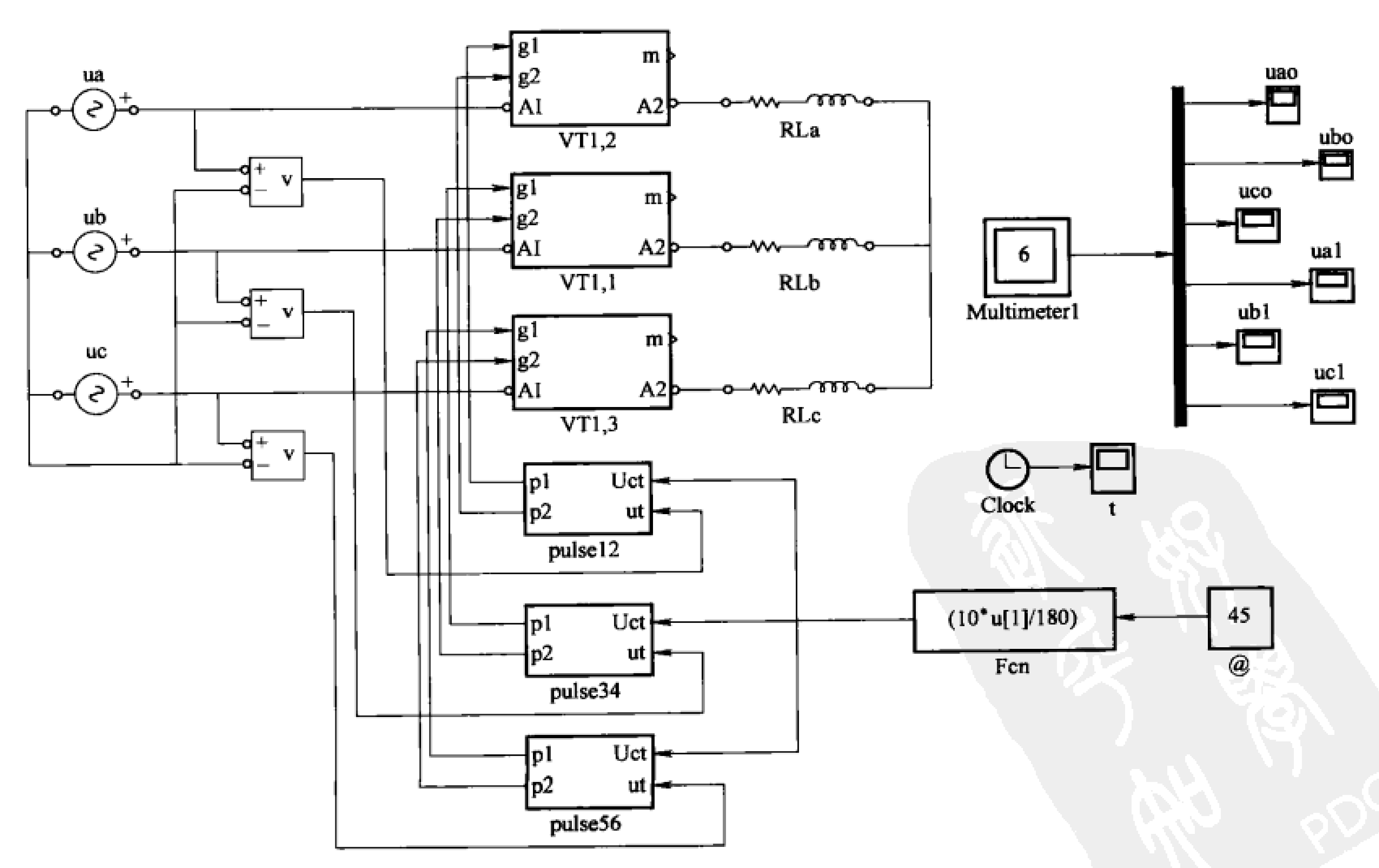


图 5-72　无中线星形联结三相交流调压器仿真模型

同；在三相中只有两相有晶闸管导通的区间，输出电压（相电压）应为导通两相线电压的1/2。随着控制角的增加，同时有三个晶闸管导通的区间逐步减小，到 $\alpha \geq 60°$时，任何时间都只有两相有晶闸管导通，导通时输出相电压等于导通两相线电压的 1/2（见图5-73b）。三相调压器输出电压较正弦波有较大畸变，使谐波增加，这可以用谐波分析模块分析（参见第 5 章第 5.1 节）。

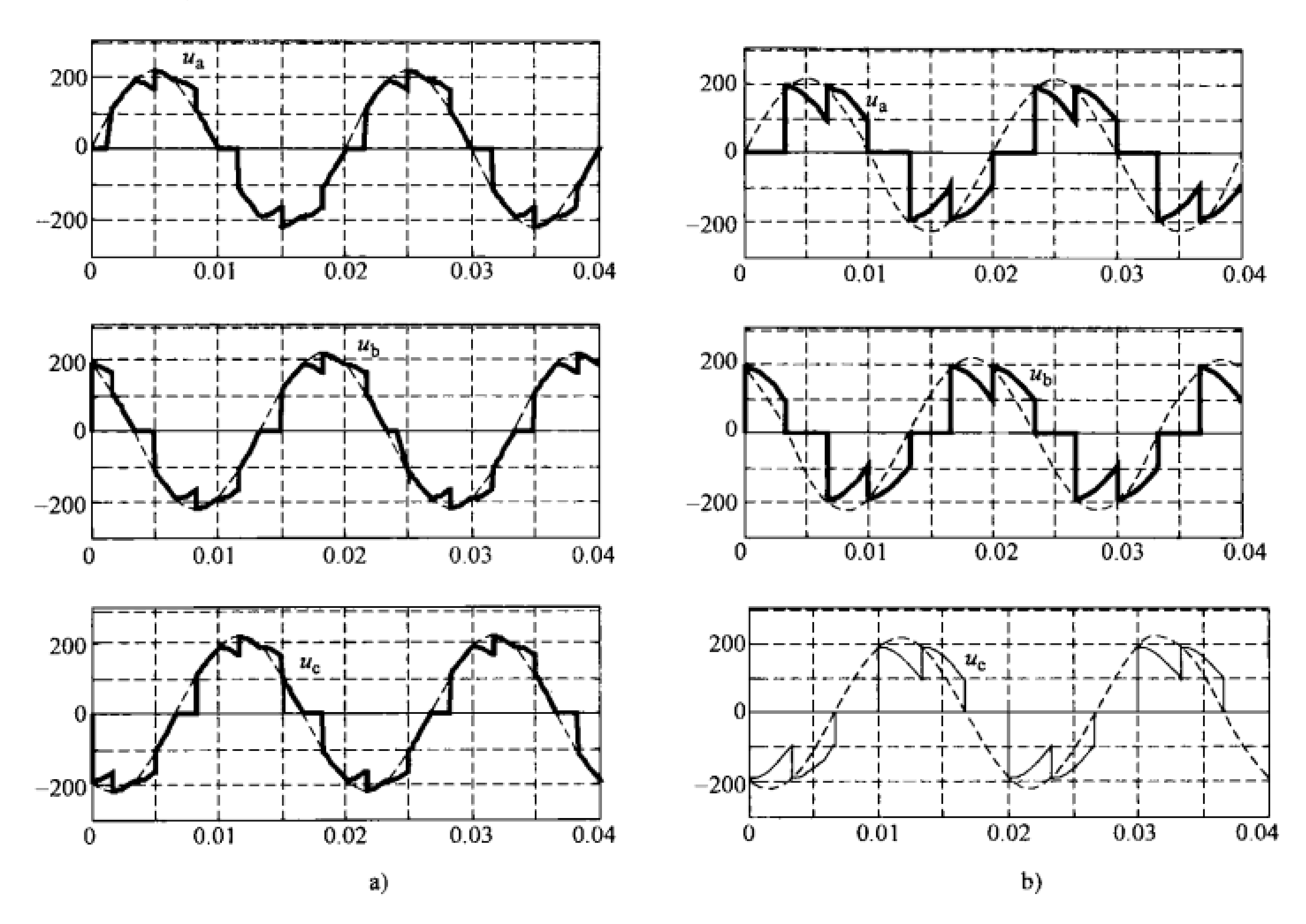


图 5-73　三相交流调压器输出电压波形
a）$\alpha=30°$　b）$\alpha=60°$

2. 支路控制三角形联结三相交流调压器

支路控制三角形联结交流调压器常用于动态无功补偿装置中（见图 5-74）。动态无功补偿装置由固定电容器和晶闸管控制的电抗器并联支路组成，通过晶闸管控制电感支路电流 i_L 而调节无功补偿装置的补偿电流 i_C 大小。其中晶闸管控制电抗器支路的连接如图 5-75 所示，

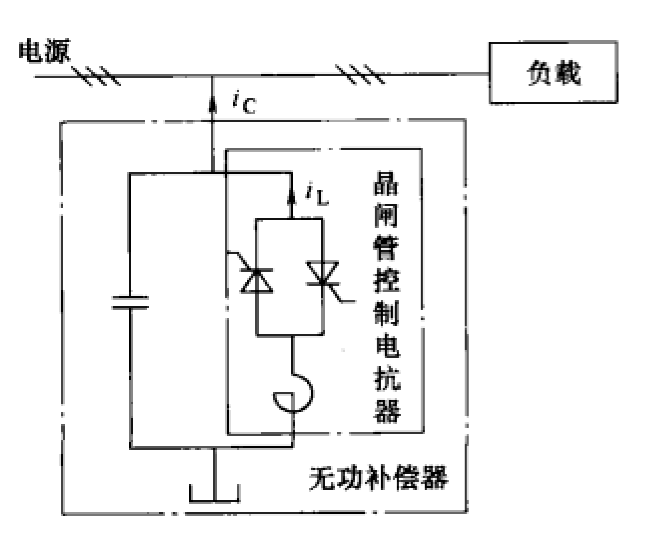


图 5-74　静止动态无功补偿器

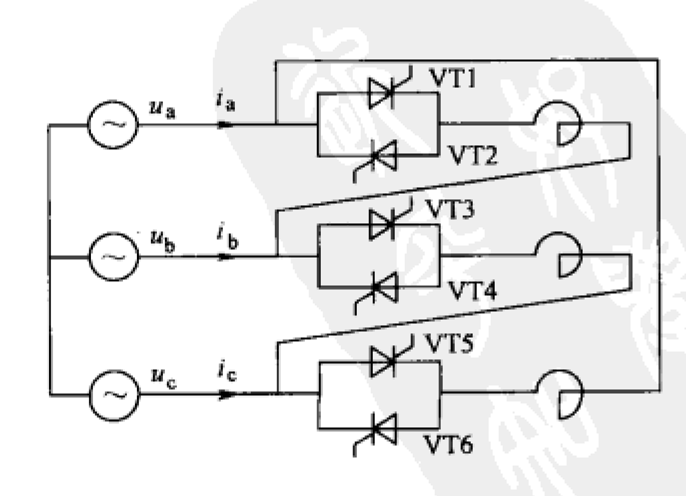


图 5-75　晶闸管控制三相电抗器

这是三角形联结的支路控制型三相交流调压电路。现对三相晶闸管控制的电抗器支路进行仿真，观察电抗器支路电流与晶闸管控制角的关系。仿真模型如图 5-76 所示，设交流电源相电压为 220V，电抗器电感量为 2mH 。在 $\alpha=120°$ 和 150°时，仿真结果如图 5-77 所示。

在图 5-77 中给出了各相线电流的波形，并画上各相相电压，以便比较，从图中可以看出，电流滞后于电压 90°，随着控制角的增加，电流减小，电抗器提供的感性无功减小，而无功补偿装置向电网提供的容性无功量增加。

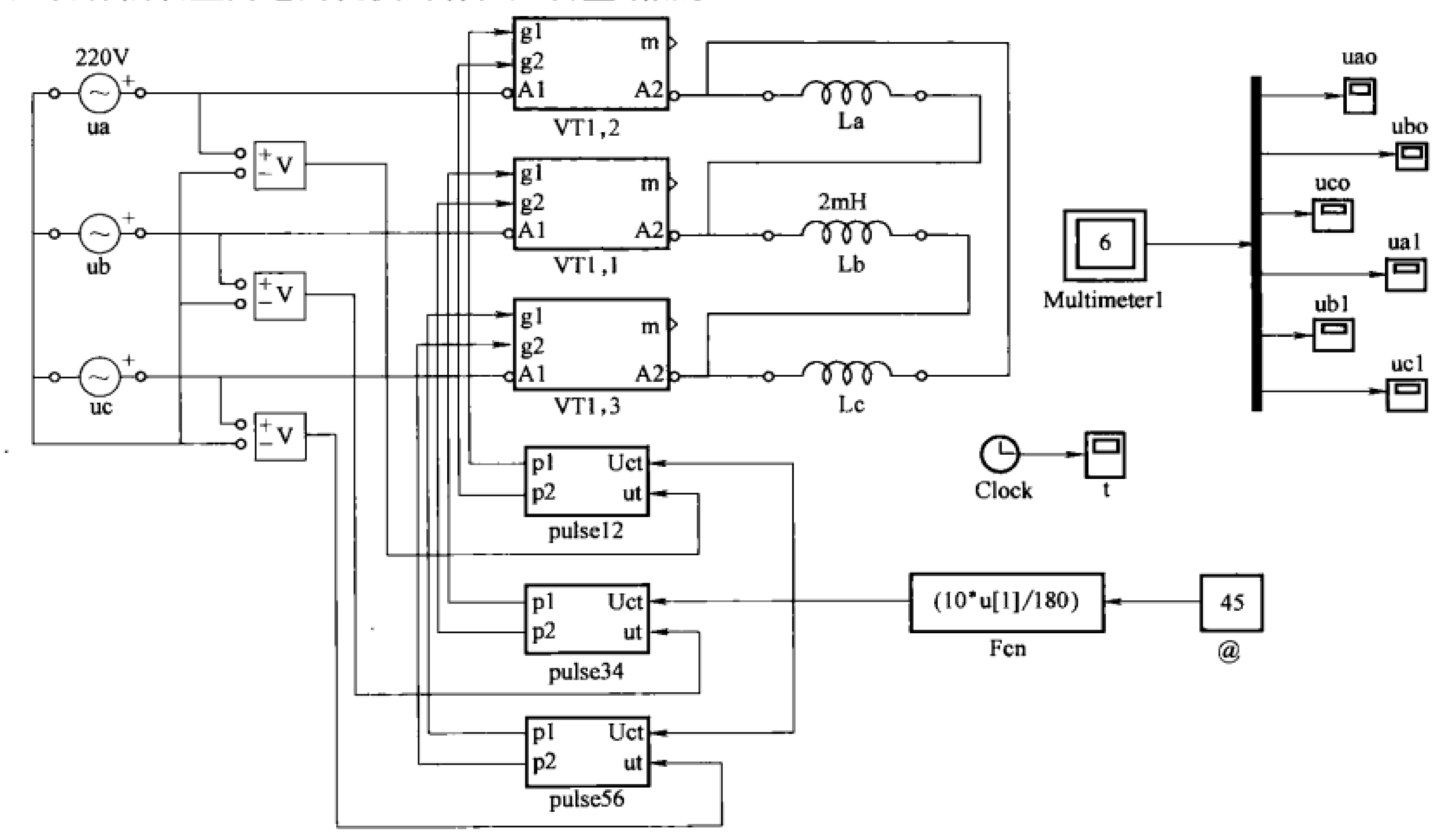


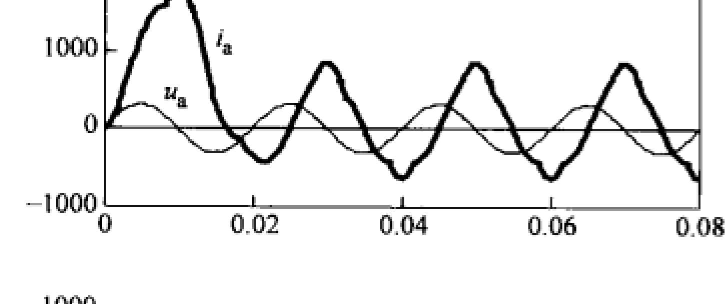
图 5-76　支路三角形联结晶闸管控制电抗器仿真模型

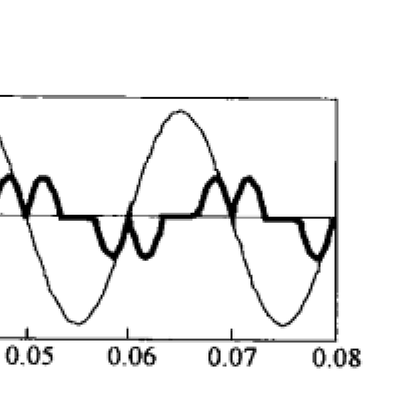
$$Q=Q_C-Q_L$$

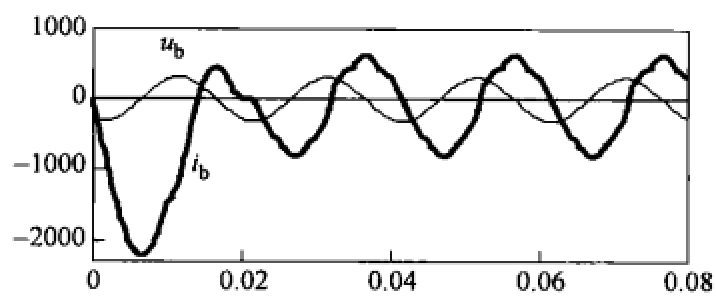
式中，Q 为无功补偿装置向电网提供的容性无功量；Q_C 为固定电容的无功；Q_L 为晶闸管控制电抗器提供的感性无功。通过晶闸管调节电抗器电流，可以实现无功补偿装置补偿量的连续调节。其中图 5-77a 的电流波形反映了装置在零状态启动时的电流冲击情况，图 5-77b只给出了稳态的电流波形。通过仿真可以直观地研究电路无功补偿量与 LC 参数的关系和控制相关问题。

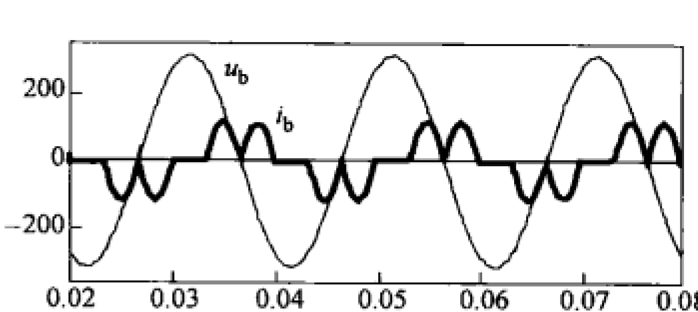
5.4.3　交-交变频电路的仿真

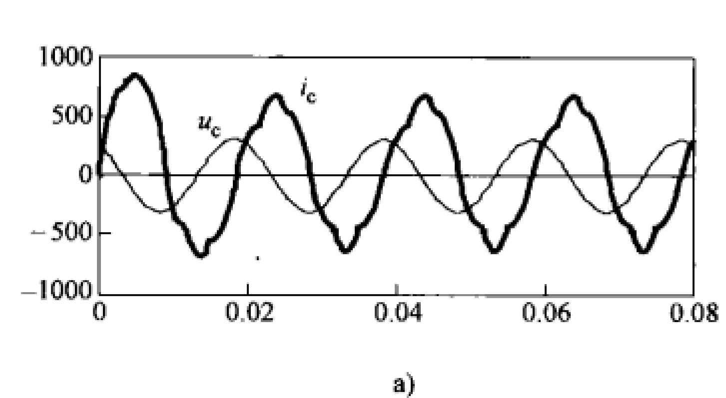
交-交变频的基本原理是通过电力电子器件的开关控制，截取三相工频电源电压的各个片断，重新拼装组合成一个新的交流电压。交-交变频的主电路一般由两组反并联的晶闸管整流电路组成（见图 5-78），整流电路常采用三相桥式。当正组桥工作时，在负载上得到正向电流，反组桥工作时，在负载上得到反向电流，改变正反两组桥的切换频率，在负载上就可以得到不同频率的交流电，实现变频。如果改变晶闸管的控制角，则输出电压随之改变，即实现了调压的控制。如果在负载电压的一周期中控制角保持不变（等 α 控制），则输出电压是带锯齿的方波，为了使输出电压接近正弦波，则要求在一周期中晶闸管控制角按一定的规律变化，常用的控制方法有余弦交点法和叠加三次谐波的交流偏置法等。下面通过仿真来











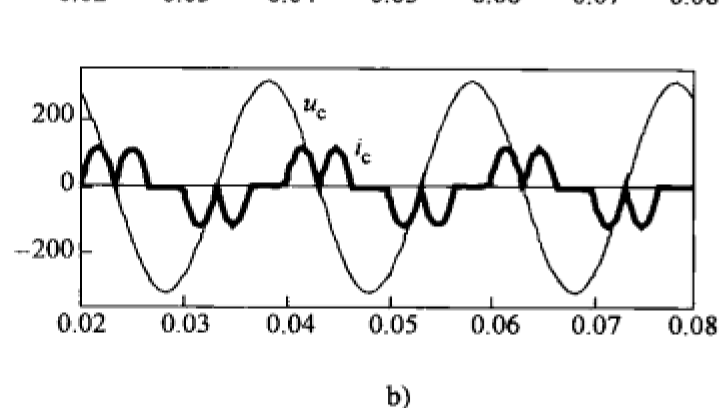


图5-77　支路三角形联结晶闸管控制电抗器电流和电源波形

a）$\alpha=120°$　b）$\alpha=150°$

研究余弦交点法，并观察采用余弦交点法调制的交-交变频效果。

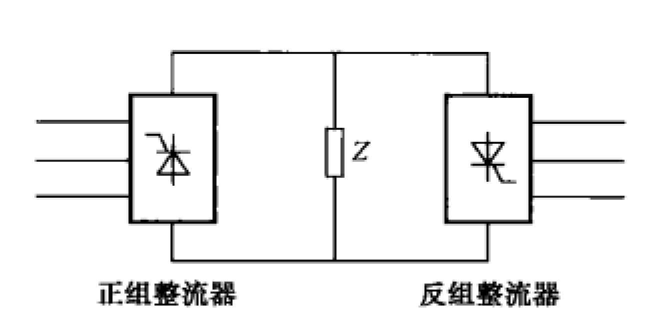


图5-78　单相交-交变频电路

余弦交点法的基本原理是：当交-交变频器输出电压波形的相邻两段与调制的目标正弦波的差值相等时，则是交-交变频器晶闸管的切换时刻。现对图5-79作进一步说明，图中 u_o 是交-交变频器输出电压波形，u_r 是调制的目标正弦波，u_o 是由线电压 u_{ab}、u_{ac}、u_{bc}、u_{ba}、u_{ca}、u_{cb}的各个片断组成的。现研究从 u_{ab} 到 u_{ac} 片断的换流，在换流的时刻C应有 $u_r-u_{ab}=u_{ac}-u_r$，在这以前 $u_r-u_{ab}<u_{ac}-u_r$，在这以后 $u_r-u_{ab}>u_{ac}-u_r$，且换流点的轨迹是 $u_{Ta}=\dfrac{u_{ab}+u_{ac}}{2}$，从图中可以看到，这是落后于 u_{ab}30°的相电压 u_a，且 $u_{ab}=u_{ac}$的正半周交点A是允许两相换流的起点，现设为 $\alpha=0°$的位置；在 $u_{ab}=u_{ac}$的负半周交点B是允许两相换流的终点，即为$\alpha=180°$的位置。如果将坐标轴线放在 $\alpha=0°$位置上，则 u_a 是一条余弦曲线，余弦曲线的下降沿AB与调制电压 u_r 的交点则

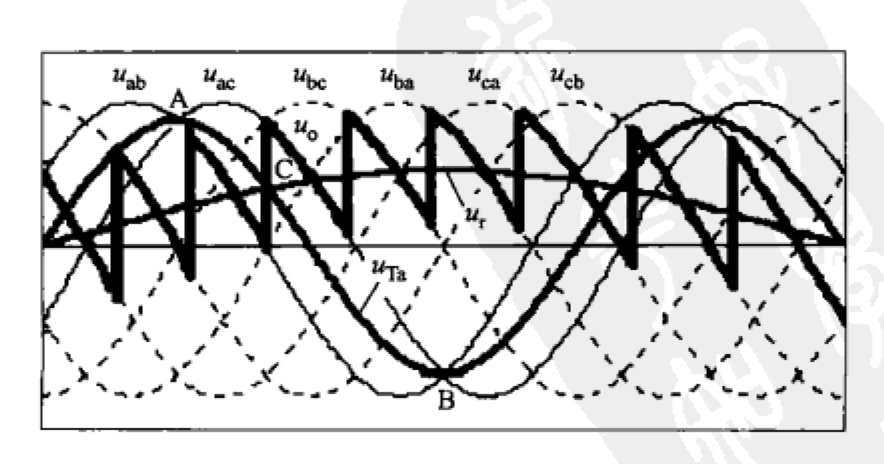


图5-79　余弦交点法基本原理

决定了 u_{ab} 与 u_{ac}（晶闸管6#与2#）的换流时刻，其他换流时刻可以类推。

根据以上原理，交-交变频器的主电路可以用两组反并联的晶闸管整流器组成，与直流电机可逆调速系统的主电路类似（参见6-4节）。设计的单相交-交变频器仿真模型如图5-80所示。模型中两组三相桥VF、VR作反并联连接，两个触发电路（6-Pulse1、6-Pulse2）的同步信号来自同步变压器T，同步变压器T采用Y-Y0联结，触发器的AB、BC、CA输入端分别连接变压器T二次侧的ua、ub、uc三相，模型中，用多路测量仪检测变压器T二次侧的三相电压ua、ub、uc。模型中两组三相桥采用逻辑无环流控制方式，逻辑控制器DLC（参考图6-26）的输出信号Ublf、U blr分别连接触发器的Block端，一般交-交变频器要求逻辑切换的“死区”小于1ms，因此逻辑控制器DLC取消了开放延时。逻辑控制器的输入分别是交流调制信号Ur*和RL负载的电流i，并根据Ur*信号的极性和电流i的有无，确定两组整流器的工作状态。交流调制信号Ur*经绝对值变换和移相控制后连接触发器的alpha-deg端。改变正弦交流电源Ur*的频率和幅值，交-交变频器的输出电压的频率和幅值作相应的变化。本模型中Ur*的幅值最大值取“1”，对晶闸管交-交变频器，其输出频率一般在0～1/2工频之间。

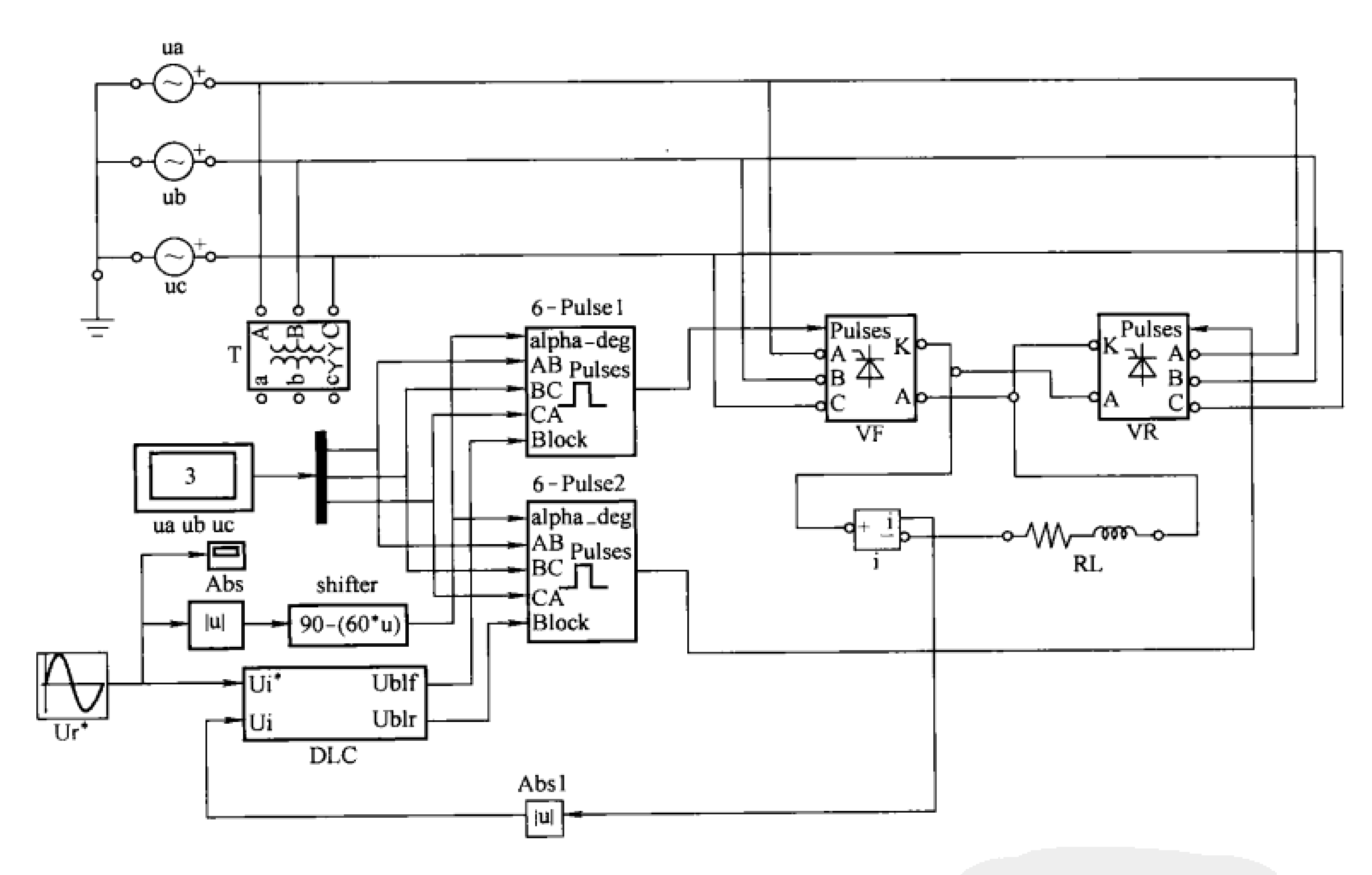


图5-80 单相交-交变频器仿真模型

图5-81是单相交-交变频器在Ur*为1/3工频、幅值为1时的仿真结果。图中：u_o 为输出电压波形，i_o 为输出电流波形，u_r 为输出电压波形的基波分量。从图中可以看到，交-交变频器输出电压是由三相电源电压的各个片断组成的，含有较多的谐波成分，对感性负载，电流 i_o 滞后于电压 u_o，在电流过零时存在逻辑切换的“死区”，死区的大小与逻辑控制器的延时有关。图5-82分别是逻辑控制器的转矩极性UT和零电流UI信号波形，以及输出的逻辑切换信号Ublf、Ublr波形。图5-83是交-交变频输出波形的谐波分析，从频谱上看到，输出波形含有较复杂的谐波成分。

由单相交-交变频器模型可以很方便地组成三相交-交变频器模型，这里不再赘述。

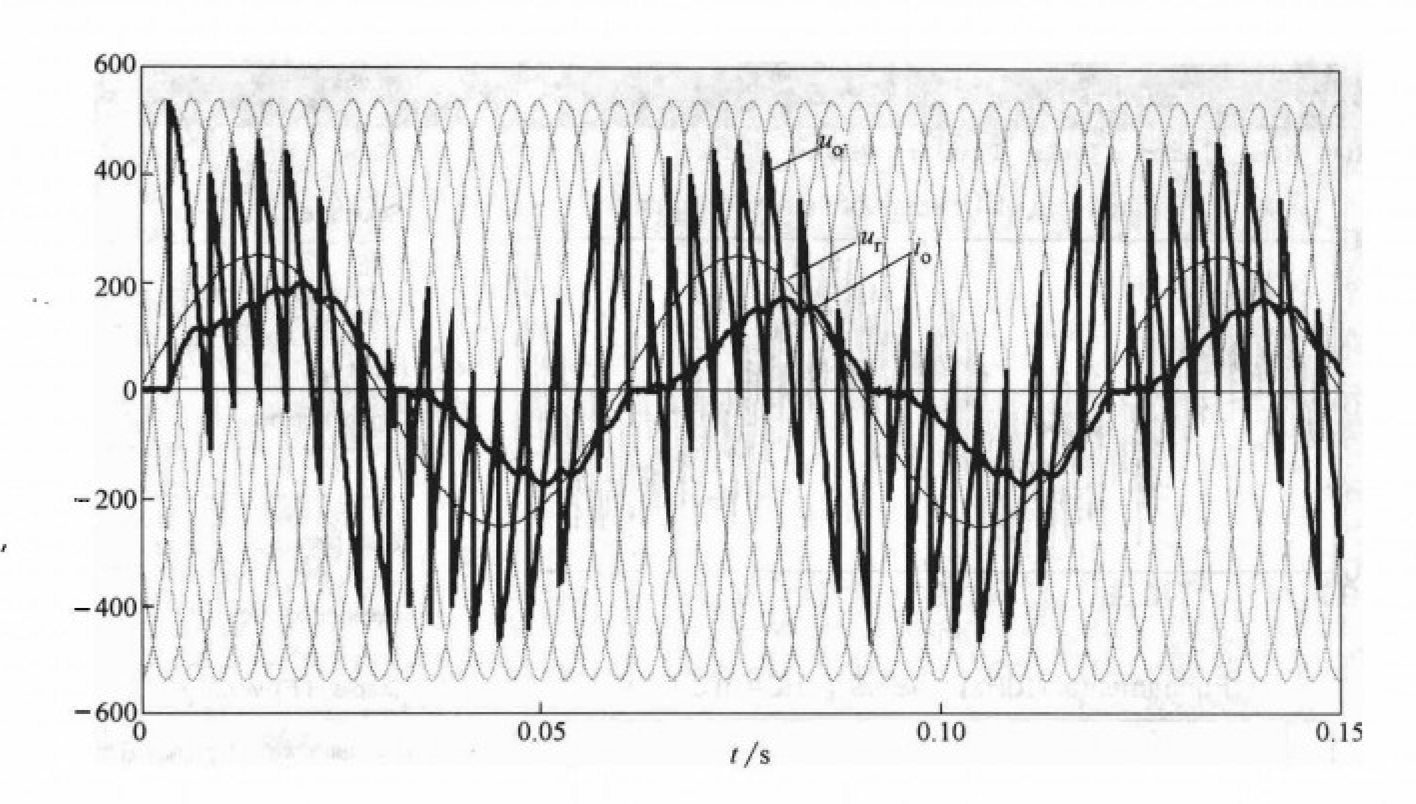


图 5-81　交-交变频器仿真波形

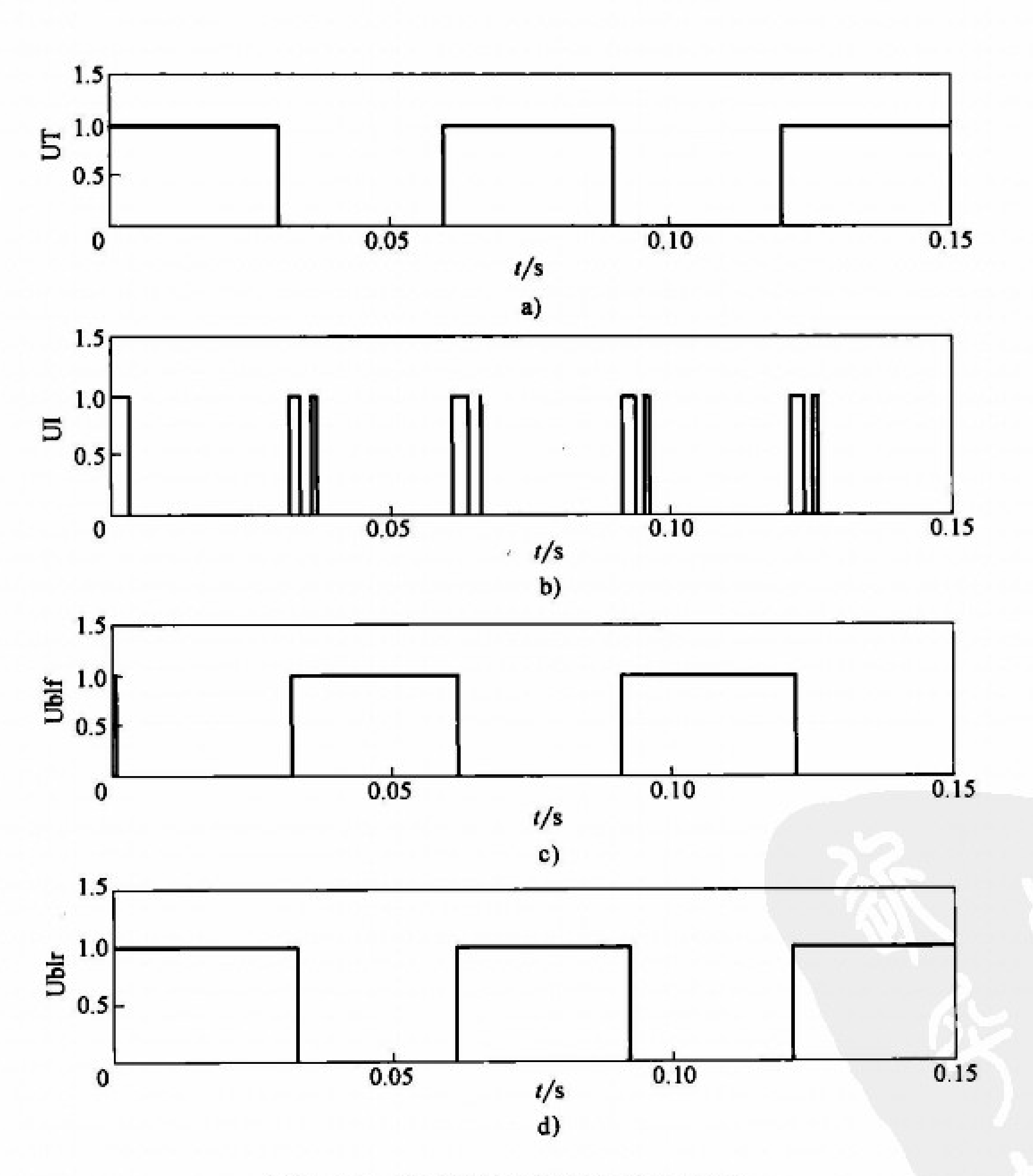


图 5-82　逻辑控制器输入输出信号

a）逻辑控制器转矩极性　b）逻辑控制器零电流信号　c）逻辑控制器输出信号 Ublf　d）逻辑控制器输出信号 Ublr

图 5-83 交-交变频的谐波分析



第 6 章　直流调速系统的仿真

直流调速是现代电力拖动自动控制系统中发展较早的技术。在 20 世纪 60 年代，随着晶闸管的出现，现代电力电子和控制理论和计算机技术的结合促进了电力传动控制技术的研究和应用的繁荣。晶闸管-直流电动机调速系统为现代工业提供了高效、高性能的动力。尽管现在交流调速迅速发展，交流调速技术越趋成熟，以及交流电机的经济性和易维护性，使交流调速广泛受到用户的欢迎。但是直流电机调速系统以其优良的调速性能仍有广阔的市场，并且建立在反馈控制理论基础上的直流调速原理也是交流调速控制的基础。现在的直流和交流调速装置都是数字化的，使用的芯片和软件各有特点，但基本控制原理有其共同性，本章主要通过仿真研究直流调速的基本原理、方法和调速性能。

6.1　直流电动机开环调速系统的仿真

直流开环调速系统的电气原理如图 6-1 所示。直流电动机电枢由三相晶闸管整流电路经平波电抗器 L 供电，并通过改变触发器移相控制信号 U_C 调节晶闸管的控制角，从而改变整流器的输出电压，实现直流电机的调速。该系统的仿真模型如图 6-2 所示。

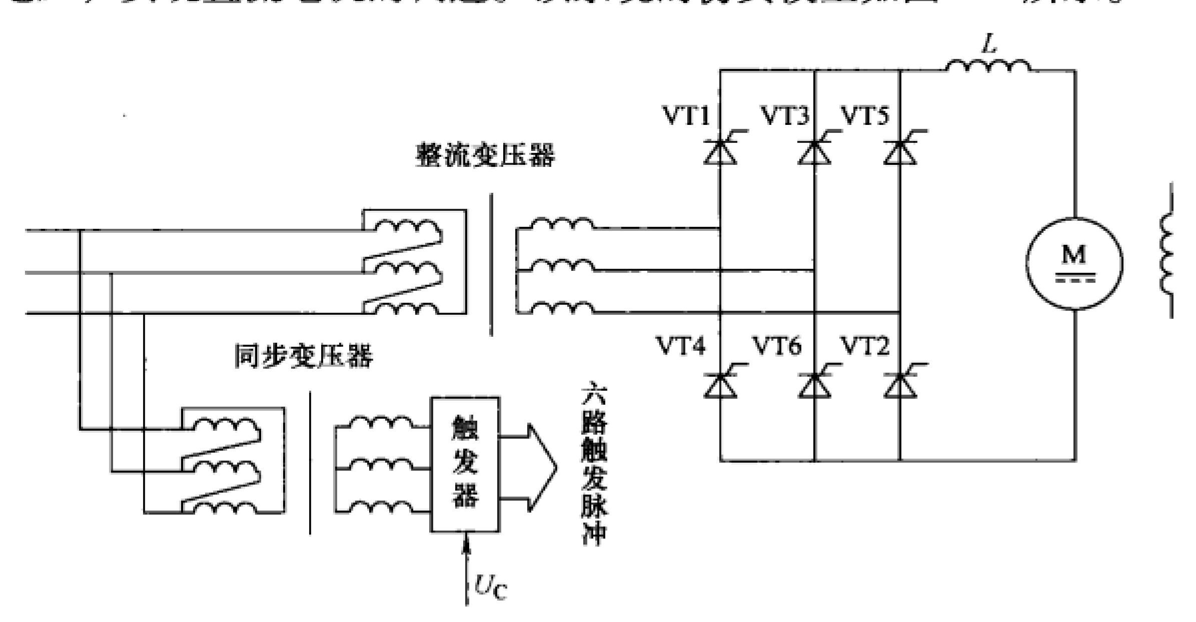


图 6-1　直流开环调速系统电气原理

在仿真中，为了简化模型，省略了整流变压器和同步变压器，整流器和触发同步使用同一交流电源，为了减小整流器谐波对同步信号的影响，宜设三相交流电源电感 $L_S=0$，直流电动机励磁由直流电源直接供电。触发器（6-Pulse）的同步电压连接如图 6-2 所示。触发器的控制角（alpha-deg 端）通过了移相控制环节（Fcn），移相控制模块的输入是移相控制信号 U_C，输出是控制角，移相控制信号 U_C 由常数模块设定。移相控制模块的特性如图 6-3 所示。移相特性的数学表达式为

$$\alpha = 90^\circ - \frac{90^\circ - \alpha_{\min}}{U_{\mathrm{Cmax}}} U_C$$

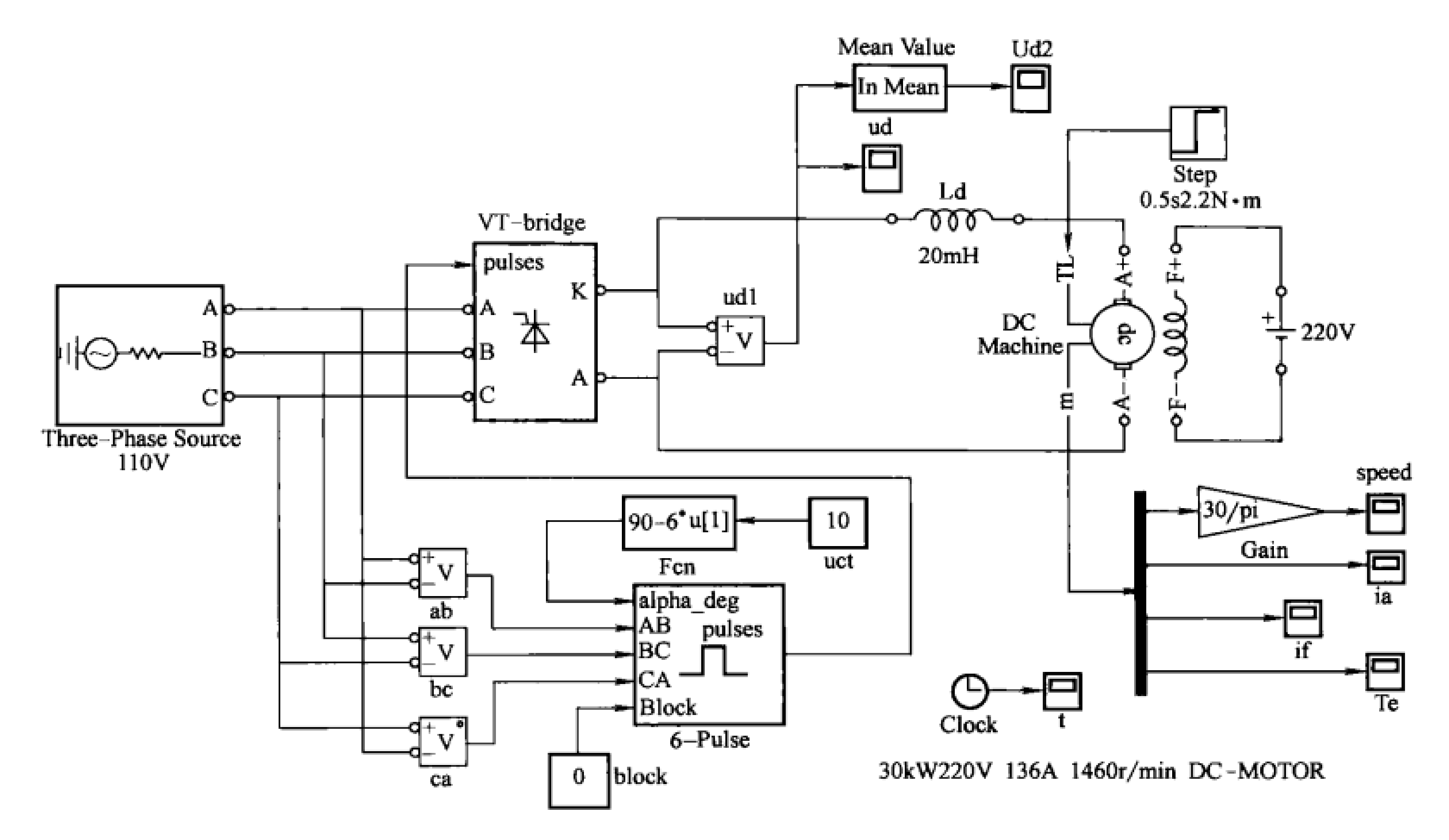


图 6-2 直流电动机开环调速系统仿真模型

在本模型中取 $\alpha_{min}=30°$，$U_{Cm}=10V$，所以 $\alpha=90-6U_C$。在电动机的负载转矩输入端 T_L 用 Step 模块设定加载时刻和加载转矩。

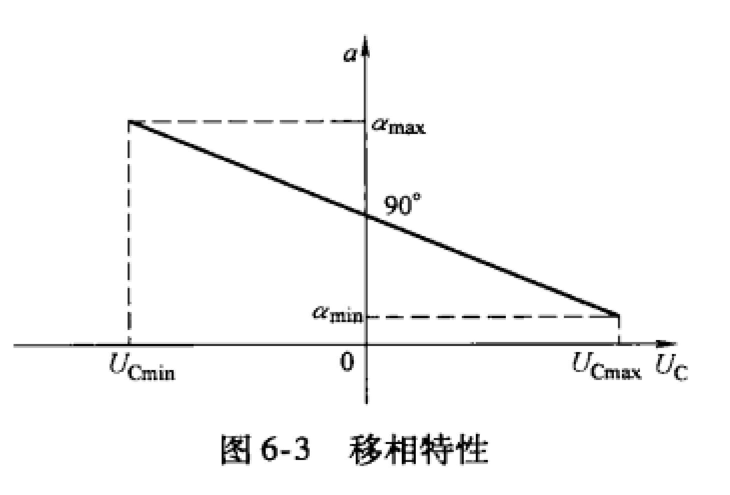


图 6-3 移相特性

【例 6-1】 已知直流电动机额定参数为 $U_{nom}=220V$，$I_{nom}=136A$，$n_{nom}=1460r/min$，四极，$R_a=0.21\Omega$，$GD^2=22.5N\cdot m^2$。励磁电压 $U_f=220V$，励磁电流 $I_f=1.5A$。采用三相桥式整流电路，设整流器内阻 $R_{rec}=0.5\Omega$。平波电抗器 $L_d=20mH$。仿真该晶闸管—整流电动机开环调速系统，观察电动机在全电压起动和起动后加额定负载时电动机的转速、转矩和电流变化。

仿真步骤：

1）绘制系统的仿真模型如图 6-2 所示。

2）设置模块参数

① 供电电源电压

$$U_2=\frac{U_{nom}+R_{rec}I_{nom}}{2.34\cos\alpha_{min}}=\frac{220+0.5\times136}{2.34\cos30°}V=142V$$

② 电动机参数

励磁电阻：

$$R_f=U_f/I_f=(220/1.5)\Omega=146.7\Omega$$

励磁电感在恒定磁场控制时可取“0”。

电枢电阻：

$$R_a = 0.21\Omega$$

电枢电感由下式估算：

$$L_a = 19.1\frac{CU_{nom}}{2pn_{nom}I_{nom}} = 19.1\frac{0.4 \times 220}{2 \times 2 \times 1460 \times 136}\text{H} = 0.00021\text{H}$$

电枢绕组和励磁绕组互感 L_{af}：

$$\text{因为}\quad C_e = \frac{U_{nom} - R_a I_{nom}}{n_{nom}} = \frac{220 - 0.21 \times 136}{1460}\text{V} \cdot \text{min/r} = 0.132\text{V} \cdot \text{min/r}$$

$$K_E = \frac{60}{2\pi}C_e = \frac{60}{2\pi} \times 0.132 = 1.26$$

$$\text{所以}\quad L_{af} = K_E/I_f = (1.26/1.5)\text{H} = 0.84\text{H}$$

电机转动惯量

$$J = GD^2/4g = (22.5/4 \times 9.8)\text{kg} \cdot \text{m}^2 = 0.57\text{kg} \cdot \text{m}^2$$

③ 额定负载转矩

$$T_L = 9.55C_e I_{nom} = 9.55 \times 0.132 \times 136 = 171.4\text{N} \cdot \text{m}$$

④ 模型参考参数见表 6-1。

表 6-1　直流电动机开环调速系统模型参数

模　　块	参 数 名	参　　数
三相电源 (Three-Phase Source)	Phase-to-phase rms voltage/V	142 * sqrt(3)
	Phase angle of phase A/degrees	0
	Frequency/Hz	50
	Internal connection	Yg
	Source resistance/Ω	0.001
	Source inductance/H	0
直流电动机 (DC Machine)	电枢电阻 R_a/Ω	0.21
	电枢电感 L_a/H	0.00021
	励磁电阻 R_f/Ω	146.7
	励磁电感 L_f/H	0
	磁场与电枢互感 L_{af}/H	0.84
	转动惯量 J(kg · m^2)	0.57
平波电抗器(inductance)	电感 L_d/H	0.02

3）设置仿真参数：仿真算法 ode15s，仿真时间 1.5s，电动机空载起动，起动 0.5s 后加额定负载 $T_L = 171.4\text{N} \cdot \text{m}$。

4）启动仿真并观察结果：仿真的结果如图 6-4 所示。其中图 6-4a 是整流器输出端的电压波形（局部），图 6-4b 是经平波电抗器后电动机电枢两端电压波形，该波形较整流器输出端的电压波形脉动减少了许多，电压平均值在 225V 左右，符合设计要求。图 6-4c 和图 6-4d 是电动机电枢回路电流和转速变化过程，在全电压直接起动情况下，起动电流很大，在 0.25s 左右起动电流下降为零（空载起动），起动过程结束，这时电动机转速上升到最高值。在起动 0.5s 后加额定负载，电动机的转速下降，电流增加。图 6-4e 是电动机的转矩变

化曲线，转矩曲线与电流曲线成比例。图 6-4f 给出了工作过程中电动机的转矩-转速特性曲线。通过仿真反映了开环晶闸管—直流电动机系统的空载起动和加载时的工作情况。

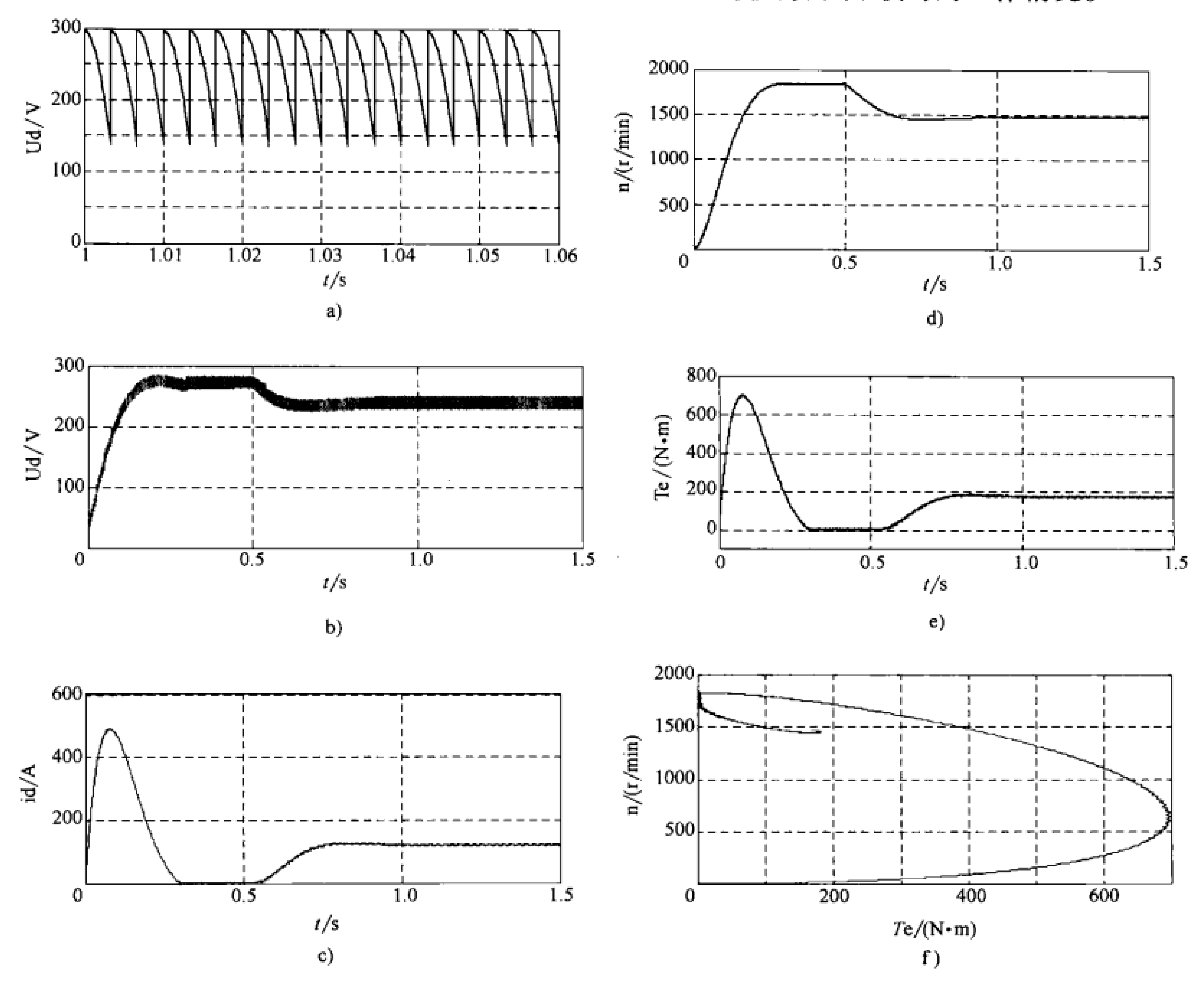


图 6-4 晶闸管—直流电动机系统仿真结果

a) 整流器输出电压 b) 电枢两端电压 c) 电枢电流 d) 电动机转速 e) 电动机转矩曲线 f) 转矩-转速特性

6.2 转速闭环控制的直流调速系统仿真

晶闸管-直流电动机系统可以通过调节晶闸管控制角改变电动机电枢电压实现调速，但是存在两个问题，①全电压起动时起动电流大；②转速随负载变化而变化，负载越大，转速降落越大，难于在负载变动时保持转速的稳定而满足生产工艺的要求。为了减小负载波动对电动机转速的影响，可以采取带转速负反馈的闭环调速系统，根据转速的偏差来自动调节整流器的输出电压，从而保持转速的稳定。

6.2.1 带转速负反馈的有静差直流调速系统

带转速负反馈的有静差直流调速系统的结构如图 6-5 所示。系统由转速给定环节 U_n^* 放

大器 K_P、移相触发器 CF、晶闸管整流器和直流电动机 M、测速发电机 TG 等组成。该系统在电动机负载增加时，转速将下降，转速反馈 U_n 减小，而转速的偏差 ΔU_n 将增大（$\Delta U_n = U_n{}^* - U_n$），同时放大器输出 U_C 增加，并经移相触发器使整流器输出电压 U_d增加，电枢电流 I_d 增加，从而使电动机电磁转矩增加，转速也随之升高，补偿了负载增加造成的转速降。带转速负反馈的直流调速系统的稳态特性方程为

$$n = \frac{K_P K_S U_n^*}{C_e(1+k)} - \frac{RI_d}{C_e(1+k)}$$

图 6-5　带转速负反馈的有静差直流调速系统组成

电动机转速降为

$$\Delta n = \frac{RI_d}{C_e(1+K)}$$

式中，$K = K_P K_S \alpha / C_e$；K_P为放大器放大倍数；K_S为晶闸管整流器放大倍数；C_e为电动机电动势常数；α 为转速反馈系数；R 为电枢回路总电阻。

从稳态特性方程可以看到，如果适当增加放大器的放大倍数 K_P，电动机的转速降 Δn 将减小，电动机将有更硬的机械特性，也就是说，在负载变化时，电动机的转速变化将减小，电动机有更好的保持速度稳定的性能。如果放大倍数过大，也可能造成系统运行的不稳定。

转速负反馈有静差调速系统的仿真模型如图 6-6 所示。模型在图 6-2 开环调速系统的基础上增加了转速给定 u_n^*（U_n^*）、转速反馈 n-feed、放大器 Gain 和反映放大器输出限幅的饱和特性模块 Saturation，饱和限幅模块的输出是移相触发器的输入 U_C，其中转速反馈直接取自电动机的转速输出，没有另加测速发电机，取转速反馈系数 $\alpha = U_n^* / n_N$。

【例 6-2】 在例 6-1 的基础上观察带转速负反馈系统在不同放大器放大倍数时对转速变化的影响，模型主要参数见表 6-2。

表 6-2　转速负反馈有静差直流调速系统模型参数

模　　块	参　数　名	参　　数
三相电源（ua，ub，uc）	Peak amplitude/V	130 * sqrt(2)
	Frequency/Hz	50
直流电动机（DC Machine）	直流电动机参数同表 6-1	
平波电抗器（Ld）	电感 inductance/H	0.01
转速反馈系数（n-feed）	alpha	0.0067
放大器（Gain1）	Kp	20（按需要调节）
饱和限幅（Saturation1）	Upper limit	10
	Lower limit	-10

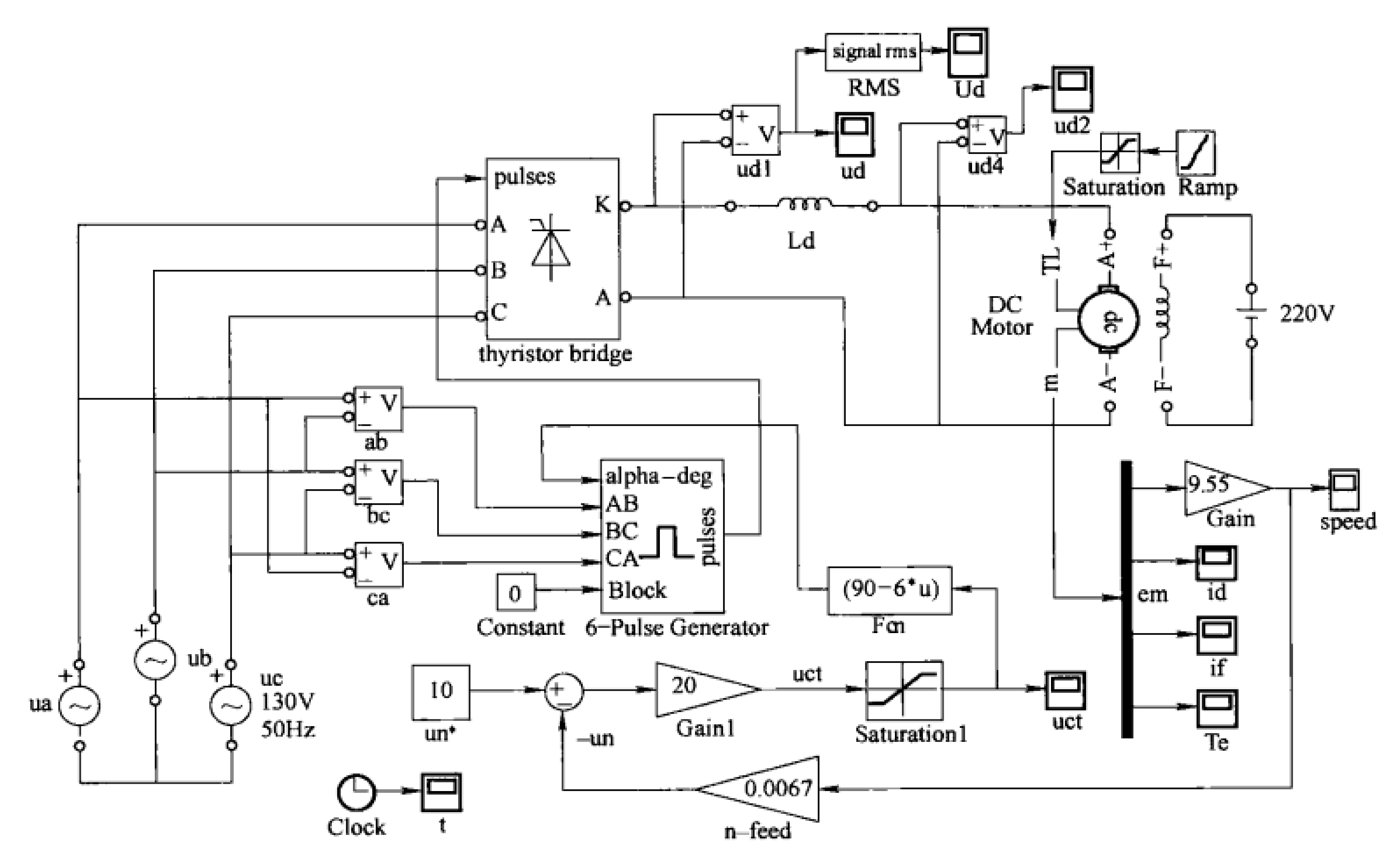


图 6-6　转速负反馈有静差直流调速系统仿真模型

在额定转速 $U_n^*=10$，$K_P=5$、10、20 时的转速响应曲线如图 6-7a 所示，随着放大器放大倍数的增加，系统的稳态转速提高，即稳态转速降减小。图 6-7b 所示为 $K_P=10$ 时的电流响应波形，从波形可以看到，由于没有电流的限制措施，在起动过程中电流仍很大，可达 370A 左右。图 6-8b 是 1/2 额定转速（$U_n^*=5$）时的转速响应曲线，以 $K_P=10$ 和 200 两种情况比较，在 $K_P=200$ 时，稳态转速降减小，但是调节过程中的振荡次数增加，这从相应的移相控制信号变化也可以看到相同的情况（见图 6-8a），由于晶闸管整流器控制的非线性，其输出电压只能在 $0\sim U_{dmax}$ 范围内变化，尽管放大倍数很高，转速还没有出现严重的不稳定现象。

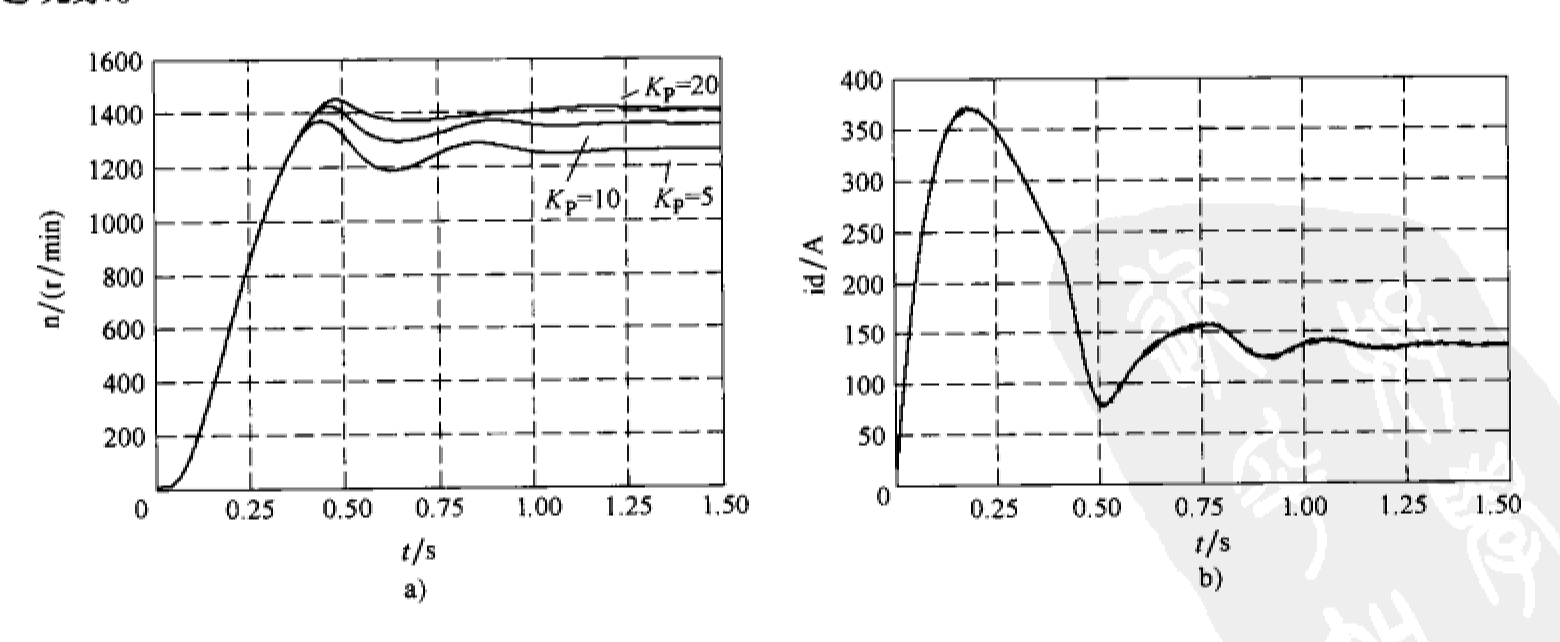


图 6-7　额定转速时的响应曲线

a）不同 K_p 的转速响应曲线　b）电流响应曲线

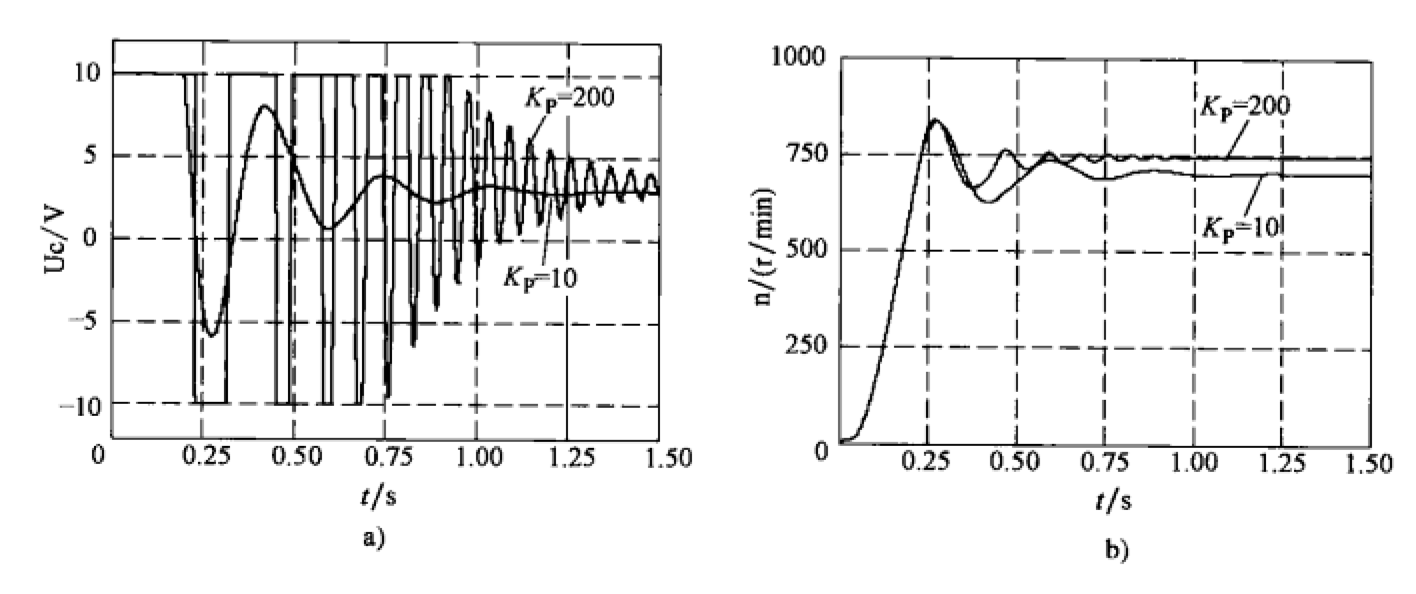


图 6-8　转速给定 $U_n^*=5$ 时的波形

a）移相控制信号 U_C　b）转速响应曲线

6.2.2　带电流截止负反馈的转速单闭环调速系统仿真

为了限制电动机的起动电流，可以在转速负反馈系统的基础上增加电流截止负反馈的措施。带电流截止负反馈的转速单闭环调速系统仿真模型如图 6-9 所示，模型在图 6-6 的基础上增加了由电流反馈 i-feed 和死区 Dead Zone 模块组成的电流截止环节。在电流反馈信号小于 Dead Zone 模块的死时区间值时，Dead Zone 模块没有输出，电流截止负反馈不起作用。当电流反馈信号大于 Dead Zone 模块的死时区间时，Dead Zone 模块的输出抵消了一部分转

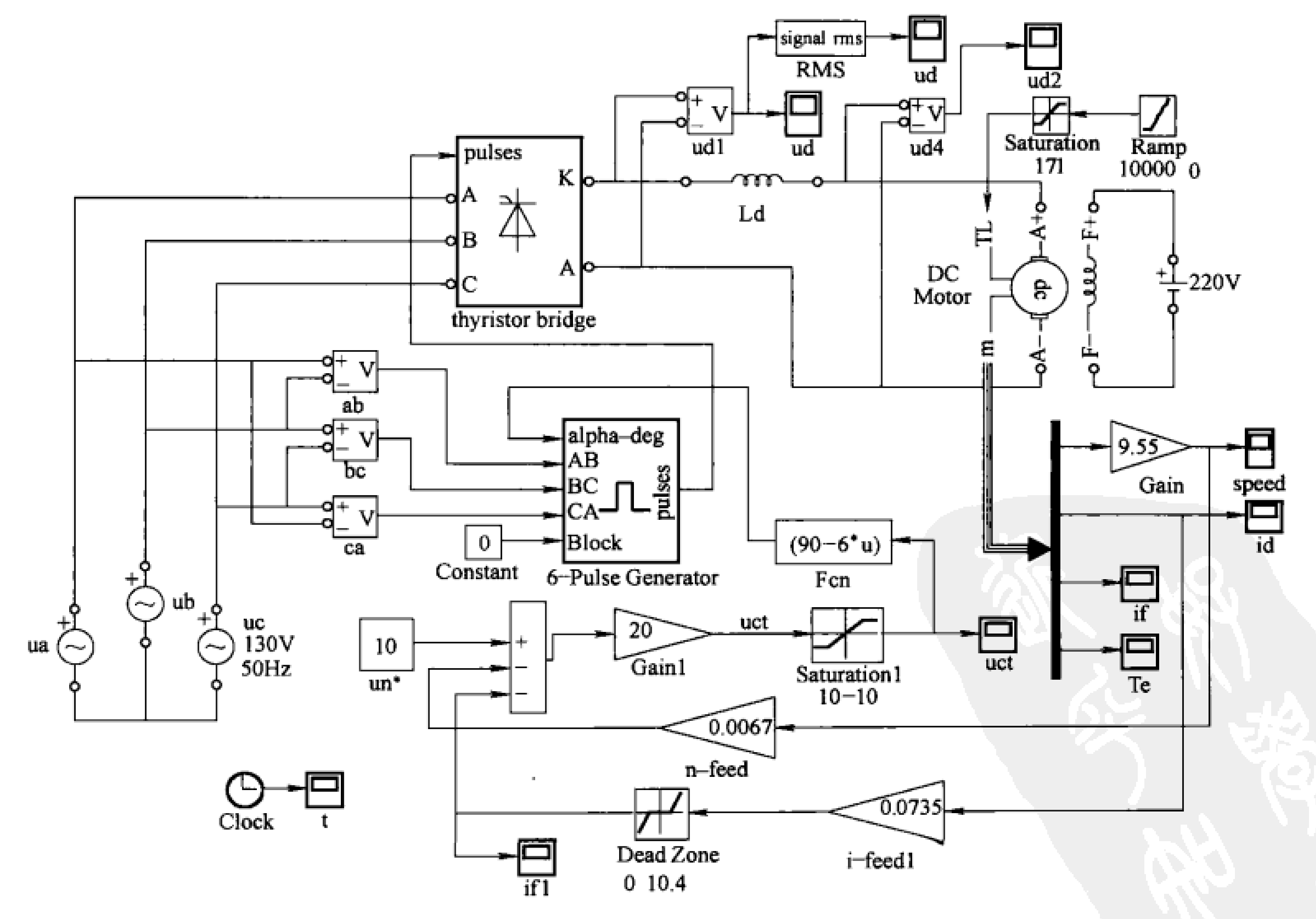


图 6-9　带电流截止负反馈的转速单闭环调速系统仿真模型

速的给定信号 $U_n{}^*$，使电流减小。电流反馈 i-feed 模块参数 beta 取 0.0735，其他模块参数与图 6-6 模型相同。

带电流截止负反馈的转速单闭环调速系统的仿真结果如图 6-10 所示，图中给出了带电流截止负反馈和没有电流截止负反馈两种情况电动机转速和电流的响应比较。带电流截止负反馈后，系统的起动电流最高值从原来的 370A 减小到 260A 左右，但是起动的时间延长，调节电流反馈系数和死区模块的死时区间，可以调节起动电流的最大值限制。

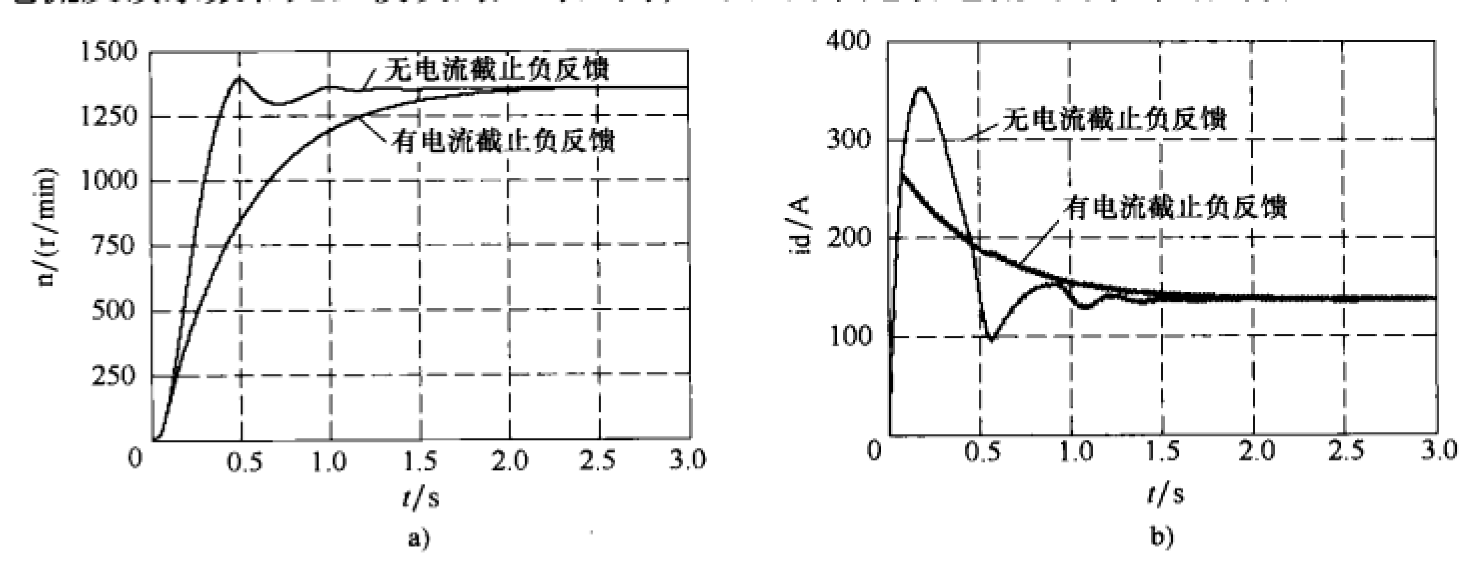


图 6-10　带电流截止负反馈的转速单闭环控制调速系统仿真结果
a）转速响应　b）电流响应

6.3　转速电流双闭环控制的直流调速系统仿真

转速电流双闭环控制的直流调速系统是最典型的直流调速系统，其原理结构如图 6-11 所示。双闭环控制直流调速系统的特点是，电动机的转速和电流分别由两个独立的调节器分别控制，且转速调节器的输出就是电流调节器的给定，因此电流环能够随转速的偏差调节电动机电枢的电流。当转速低于给定转速时，转速调节器的积分作用使输出增加，即电流给定上升，并通过电流环调节使电动机电流增加，从而使电动机获得加速转矩，电动机转速上升。当实际转速高于给定转速时，转速调节器的输出减小，即电流给定减小，并通过电流环调节使电动机电流下降，电动机将因为电磁转矩减小而减速。在当转速调节器饱和输出达到限幅值时，电流环即以最大电流限制 I_{dm} 实现电动机的加速，使电动机的起动时间最短，在可逆调速系统中实现电动机的快速制动。在如图 6-11 所示的不可逆调速系统中，由于晶闸

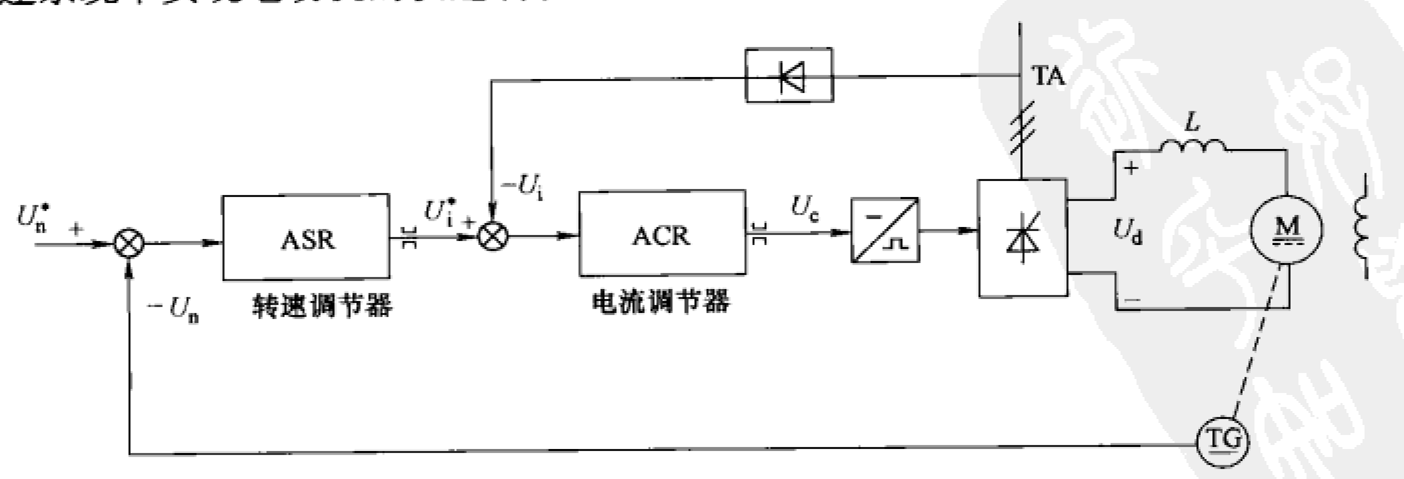


图 6-11　转速电流双闭环控制直流调速系统原理图

管整流器不能通过反向电流，因此不能产生反向制动转矩而使电动机快速制动。

直流双闭环系统的仿真可以依据系统的动态结构图进行，也可以用 power system 的模块来组建。两种仿真不同在于主电路，前者晶闸管和电动机用传递函数来表示，后者晶闸管和电动机使用 power system 的模块，而控制部分是相同的。下面对两种方法分别介绍。

6.3.1　按直流双闭环系统动态结构图的仿真

依据系统的动态结构图的仿真模型如图 6-12 所示，仿真模型与系统动态结构图的各个环节基本上是对应的，需要指出的是，双闭环系统的转速和电流两个调节器都是有饱和特性和带输出限幅的 PI 调节器，为了充分反映在饱和和限幅非线性影响下调速系统的工作情况，需要构建考虑饱和和输出限幅的 PI 调节器，过程如下：

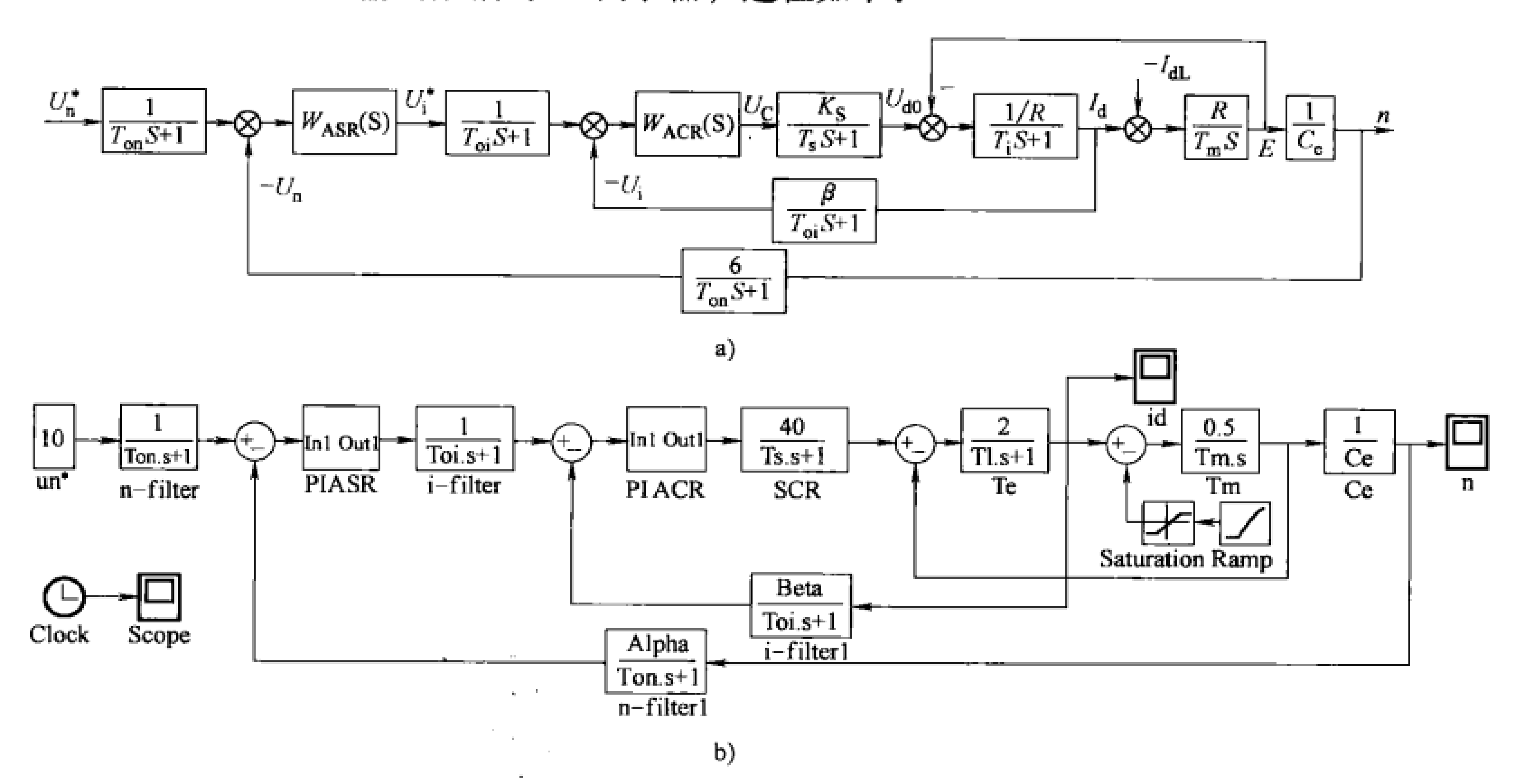


图 6-12　直流双闭环调速系统动态结构图和仿真模型

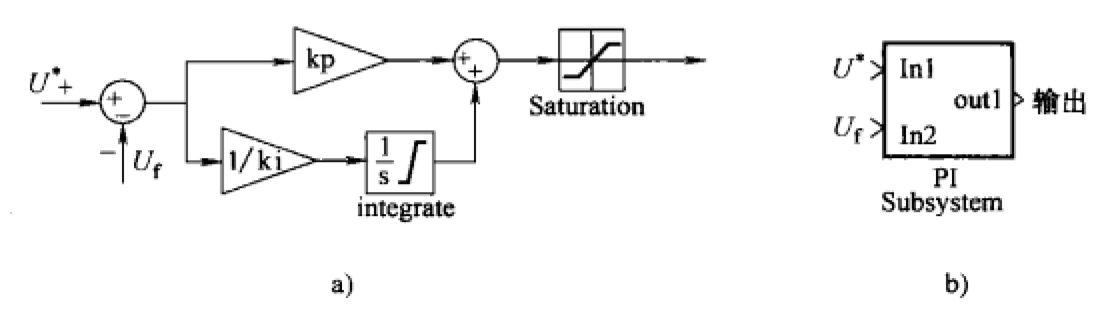
线性 PI 调节器的传递函数为

$$W_{PI}(S)=K_P+\frac{1}{K_iS}=K_P\frac{1+\tau S}{\tau S}$$

式中，K_P 为比例系数；K_i 为积分系数；$\tau=K_PK_i$。

上述 PI 调节器的传递函数可以直接调用 SIMULINK 中的传递函数或零极点模块。而考虑饱和和输出限幅的 PI 调节器模型如图 6-13a 所示。模型中比例和积分调节分为两个通道，其中积分调节器 integrate 的限幅表示调节器的饱和限幅值，而调节器的输出限幅值由饱和模块 Saturation 设定。当该调节器用作转速调节器 ASR 时，在起动中由于开始转速偏差大，调节器输出很快达到输出限幅值，在转速超调后首先积分器退饱和，然后转速调节器输出才从限幅值开始下降。为了使系统模型更简洁，利用了 SIMULINK 的打包功能（Great subsystem）将调节器模型缩小为一个分支模块，如图 6-13b 所示。

【例 6-3】　以例 6-1 的晶闸管-直流电动机系统为基础设计一个转速电流双闭环控制的调速系统，设计指标为电流超调量 $\sigma_i\%\leqslant5\%$，空载起动到额定转速时的转速超调量 $\sigma_n\%\leqslant$



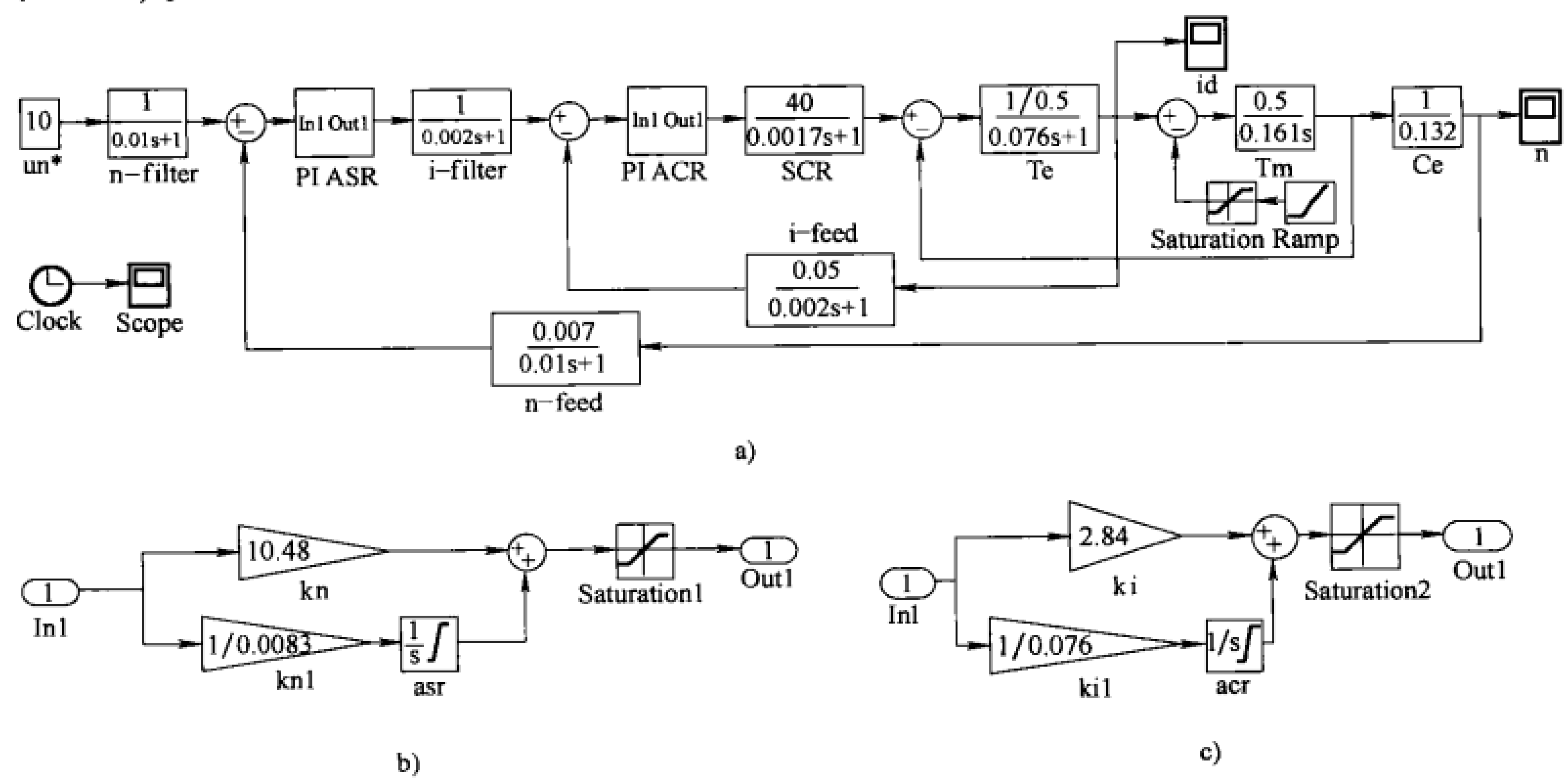
a) b)

图 6-13 带饱和和输出限幅的 PI 调节器及分支模块

10%。过载倍数 $\lambda=1.5$，取电流反馈滤波时间常数 $T_{oi}=0.002s$，转速反馈滤波时间常数 $T_{on}=0.01s$。取转速调节器和电流调节器的饱和值为 12V，输出限幅值为 10V，额定转速时转速给定 $U_n{}^*=10V$。仿真观察系统的转速、电流响应和设定参数变化对系统响应的影响。

仿真步骤：

1）构建仿真模型：根据转速电流双闭环控制的直流调速系统动态结构图，提取各元器件的仿真模块，连接模块，得到按传递函数仿真的双闭环控制直流调速系统仿真模型（见图 6-14a）。



a)

b)

c)

图 6-14 仿真模型和参数

a）转速电流闭环控制系统仿真模型 b）转速调节器 PI-ASR 参数 c）电流调节器 PI-ACR 参数

2）调节器参数计算和设定：按工程设计方法设计和选择转速和电流调节器参数，ASR 和 ACR 都采用 PI 调节器。

① 电流调节器参数计算

电流反馈系数：

$$\beta=\frac{U_{im}^*}{\lambda I_{nom}}=\frac{10}{1.5\times136}=0.05$$

电机转矩时间常数：

$$T_m=\frac{GD^2R_\Sigma}{375C_eC_m}=\frac{3.53\times2.85}{375\times9.55\times0.132^2}s=0.161s$$

电机电磁时间常数：

$$T_l = \frac{L_\Sigma}{R_\Sigma} = \frac{(200+16)\times 10^{-3}}{2.85}\text{s} = 0.076\text{s}$$

三相晶闸管整流电路平均失控时间：

$$T_s = 0.0017\text{s}$$

电流环的小时间常数为：

$$T_{\Sigma i} = T_s + T_{oi} = (0.0017 + 0.002)\text{s} = 0.0037\text{s}$$

根据电流超调量 $\sigma_i\% \leqslant 5\%$ 的要求，电流环按典型 I 型系统设计，电流调节器选用 PI 调节器，其传递函数为

$$W_{ACR}(S) = K_{Pi} + \frac{1}{K_{Ii}S} = K_i\frac{1+\tau_i S}{\tau_i S}$$

其中：

$$\tau_i = T_l = 0.076\text{s}$$

$$K_i = \frac{\tau_i R_\Sigma}{2T_{\Sigma i}\beta K_s} = \frac{0.076\times 2.85}{2\times 0.0037\times 0.272\times 37.84} = 2.84$$

$$K_{Ii} = \frac{\tau_i}{K_i} = \frac{0.076}{2.84} = 0.0268$$

② 转速调节器参数计算

转速反馈系数：

$$\alpha = \frac{U^*_{nom}}{n_{nom}} = \frac{10}{1500} = 0.00667\text{V}\cdot\text{min/r}$$

为加快转速的调节速度，转速环按典型 Ⅱ 系统设计，并选中频段宽度 $h=5$，转速调节器的传递函数为

$$W_{ASR}(S) = K_{Pn} + \frac{1}{K_{In}S} = K_n\frac{1+\tau_n S}{\tau_n S}$$

其中：

$$\tau_n = hT_{\Sigma n} = h(2T_{\Sigma i} + T_{on}) = 5\times(2\times 0.0037 + 0.01)\text{s} = 0.087\text{s}$$

$$K_n = \frac{(h+1)\beta C_e T_m}{2h\alpha R T_{\Sigma n}} = \frac{6\times 0.272\times 0.132\times 0.161}{2\times 5\times 0.00667\times 2.85\times 0.0174} = 10.49$$

$$K_{In} = \frac{\tau_n}{K_n} = \frac{0.087}{10.48} = 0.0083$$

模型各环节参数如图 6-14 所示，其中调节器的参数见表 6-3，调节器的积分环节的限幅值为 ±12，调节器输出限幅值为 ±10。

表 6-3　转速电流闭环控制系统模型主要参数

电　源	160V(峰值)50Hz
电动机	$R_a=0.21\Omega$　$L_a=0.00021\text{h}$　$U_f=220\text{V}$　$U_f=220\text{V}$　$R_f=146.7\Omega$　$L_f=0$ $L_{af}=0.84\text{H}$　$J=0.57\text{kg}\cdot\text{m}^2$
转速调节器 PI-ASR	$K_{pn}=10.49$　$K_n=1/0.0083=120.5$
电流调节器 PI-ACR	$K_{pi}=2.48$　$K_i=1/0.0268=37.3$
电抗器	$L_{d1-4}=0.002\text{H}$　$L_d=0.015\text{H}$

3）设定模型仿真参数：仿真算法ode15，仿真时间 1.5s。在 0.8s 时突加 1/2额定负载。

4）启动仿真及结果：从仿真结果（见图6-15）可以看到，电动机的起动经历了电流上升、恒流升速和转速超调后的调节三个阶段。与该电动机的开环系统相比（见图6-4），电动机起动电流大幅度下降，电流环发挥了调节作用，使最大电流限制在设定的范围以内。在 0.8s 时突加 1/2 额定负载后电动机电流上升转速下降，经过0.2s 左右时间的调节，转速恢复到给定值。修改调节器参数，可以观察在不同参数条件下双闭环系统电流和转速的响应，修改转速给定，也可以观察电动机在不同转速时的工作情况。

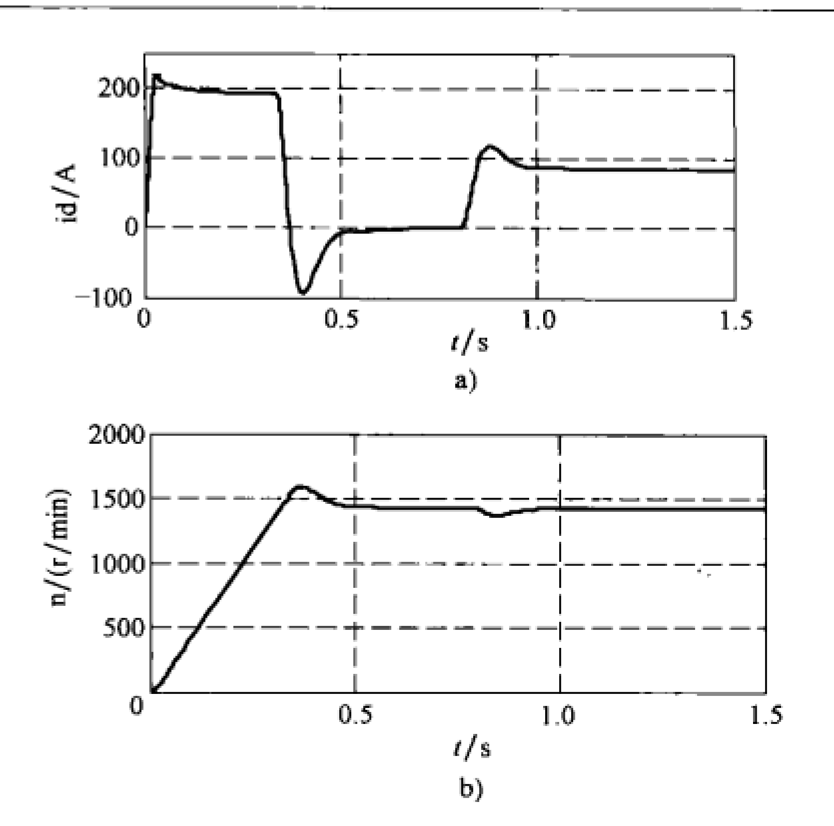


图 6-15 按动态结构图仿真的电流和转速响应曲线
a）电流响应 b）转速响应

6.3.2 使用 power system 模块的直流双闭环系统仿真

采用 power system 模块组成的转速电流双闭环控制直流调速系统仿真模型如图 6-16 所示。模型由晶闸管-直流电动机组成的主电路和转速电流调节器组成的控制电路两部分组成。其中的主电路部分，交流电源、晶闸管整流器、触发器、移相控制环节和电动机等环节使用 power system 模型库的模块，参见本章 6.1 节。控制回路的主体是转速和电流两个调节器，以及反馈滤波环节，这部分与前述按动态结构图的双闭环系统仿真相同，将这两部分拼接起来即组成晶闸管-电动机转速电流双闭环控制直流调速系统的仿真模型。

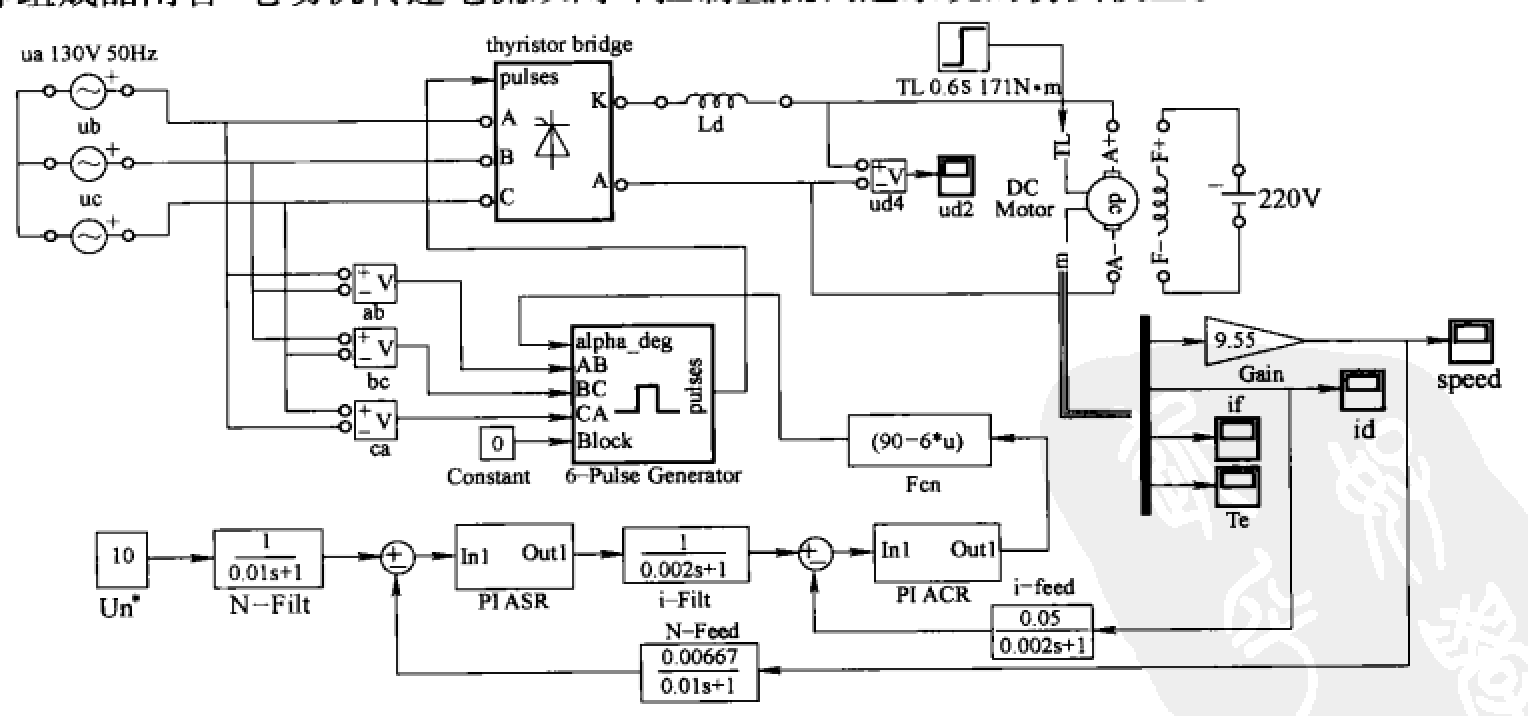


图 6-16 转速电流双闭环控制直流调速系统仿真模型

模型中转速反馈和电流反馈均取自电机测量单元的转速和电流输出端，减少了测速和电流检测环节，这不会影响仿真的真实性。电流调节器 ACR 的输出端接移相特性模块（shift-

er）的输入端，而电流调节器 ACR 的输出限幅就决定了控制角的 α_{min} 和 α_{max} 限制。

图 6-16 与图 6-14a 仿真模型的不同在于以晶闸管整流器和电动机模型取代了动态结构图中的晶闸管整流器和电动机传递函数，由于动态结构图中的晶闸管整流器和电动机传递函数是线性的，其电流可以反向（见图 6-15a），因此转速调节过程要快一些，而实际的晶闸管整流器不能通过反向电流，因此仿真的结果略有不同，采用晶闸管整流器和电动机模型的仿真可以更好地反映系统的工作情况。

模型采用与图 6-14 系统相同的参数（见表 6-3），模型的仿真结果如图 6-17 所示。其中图 6-17a 为电动机电枢两端电压，图 6-17b 为电动机转速变化曲线，图 6-17c 为电流响应曲线。从转速和电流波形可以看到，在起动阶段，电动机以恒线流起动，在 0.4s 时起动过程结束，电枢电流下降到零，转速上升到最高且大于 1450r/min，尽管转速已经超调，电流给定变“-”，但是本系统为不可逆调速系统，晶闸管整流装置不能产生反向电流，这时电枢电流为零，电动机的电磁转矩也为零，没有反向制动转矩，又因为是在理想空载起动状态，所以电动机保持在最高转速状态。0.5s 后加上负载，电动机转速下降，ASR 开始退饱和，电流环发挥调节作用，使电动机稳定在给定转速上。这结果与按双闭环调速系统动态结构图分析的结构有所不同，在动态结构图中，由于晶闸管整流器的传递函数是线性的，输出电压可以变负，电动机电流出现负值（见图 6-15a），因此从调节过程来看，按动态结构图的仿真调节速度较快。以上是电动机空载起动的情况，如果电动机带负载起动，则两者基本相同。

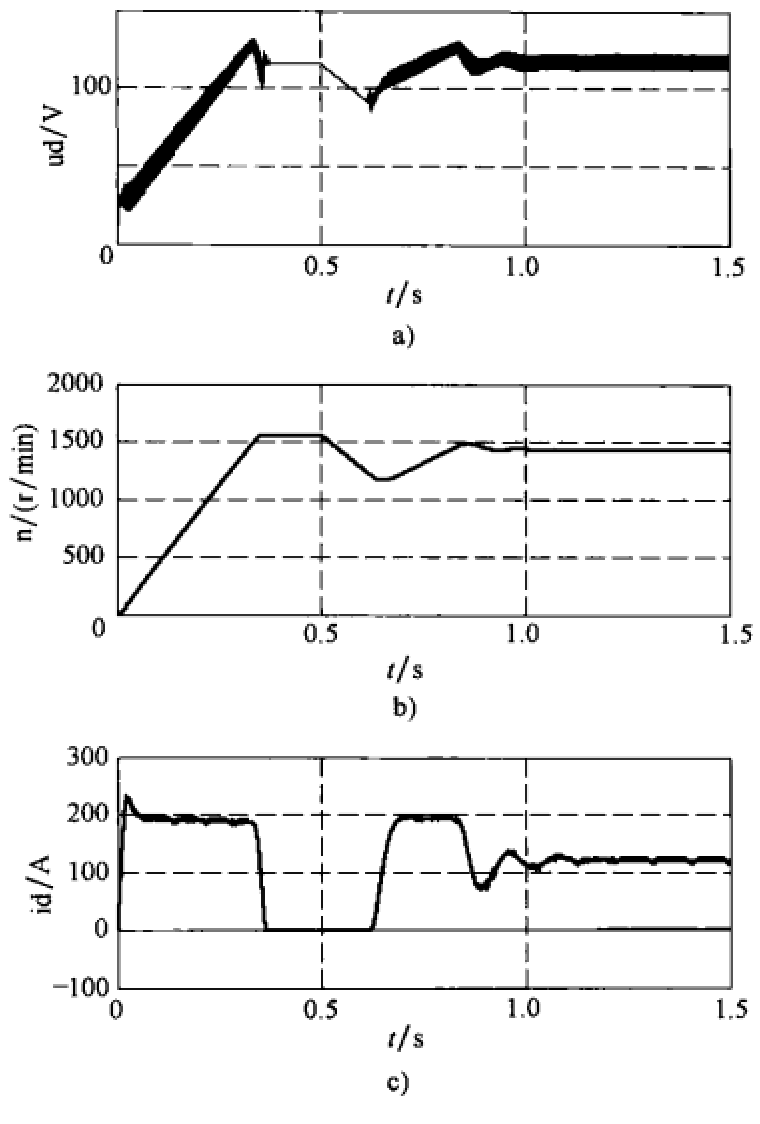


图 6-17 晶闸管-电动机模型双闭环系统仿真结果
a）整流器输出电压 b）转速响应 c）电流响应

6.4 直流可逆调速系统的仿真

直流电动机的可逆运行需要电动机产生正向和反向转矩，由电动机转矩公式 $T_e = C_m \Phi I_d$ 可知，改变转矩方向有两种方法：一是改变电机励磁 Φ 的方向；二是改变电枢电流 I_d 的方向，本节主要讨论电枢可逆的方案。

在晶闸管-直流电动机系统中，因为晶闸管整流器的单向导电性能，不能产生反向电流，因此在晶闸管-直流电动机可逆系统中，需要将两套整流器反并联给电动机供电（见图 6-18），图中一套整流器向电动机提供正向电流，称正组整流器 VF；一套整流器向电动机提供反向电流，称反组整流器 VR。由于两组整流器反并联，两组整流器的工作状态就有几种情况。

1）两组整流器都同时工作于整流状态。在这种状态下，两组整流器的输出电压将顺向连接，会产生很大的环流（指不经过电动机，而在两组整流器中流通的电流），这是不允许

的工作状态。

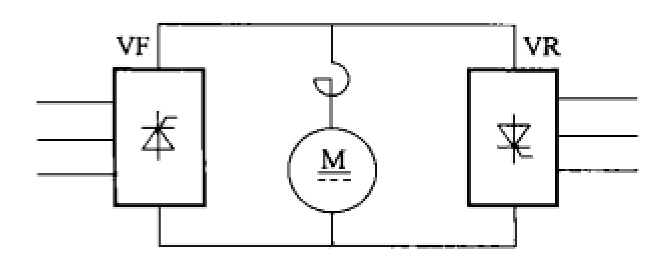


图 6-18 可逆系统两组整流器的联接

2）一组整流器工作在整流状态，其控制角为 α（$0° \leqslant \alpha \leqslant 90°$）；另一组整流器工作在逆变状态，其控制角为 β（$0° \leqslant \beta \leqslant 90°$），且 $\beta = 180° - \alpha$。如果 $\alpha = \beta$，则两组整流器输出平均电压相等，没有直流环流，但由于两组整流器输出的瞬时电压仍可能不相等，还会产生瞬时脉动环流。如果 $\alpha < \beta$，则整流组输出平均电压大于逆变组输出平均电压，则两组整流器间既有直流环流也会有瞬时脉动环流。如果 $\alpha > \beta$，则整流组输出平均电压小于逆变组输出平均电压，不会产生直流环流，但仍会产生脉动环流。这几种情况统称配合控制的有环流可逆系统。

3）在一组整流器工作时（无论工作在整流还是逆变状态），另一组整流器不给触发脉冲，则整流器不会导通，即处于封锁状态，这时两组整流器之间不可能有环流通路，既不会产生直流，环流也不会产生脉动环流，采用这种控制模式的可逆系统称无环流可逆系统。无环流可逆系统一般有逻辑无环流可逆调速系统和错位无环流可逆调速系统两种。

本节讨论 $\alpha = \beta$ 配合控制的有环流可逆调速系统和逻辑无环流可逆调速系统的仿真问题。

6.4.1 $\alpha = \beta$ 配合控制的有环流可逆调速系统

1. $\alpha = \beta$ 配合控制的有环流可逆调速系统工作原理

$\alpha = \beta$ 配合控制的有环流可逆调速系统的电气原理图如图 6-19 所示。图中主电路由两组三相桥式晶闸管全控型整流器反并联组成，并共用同一路三相电源。由于采用 $\alpha = \beta$ 配合控制方式，在两组整流器之间没有直流环流，但还存在脉动环流，在主电路中串入了 4 个均衡电抗器 $L_{c1} \sim L_{c4}$，用于限制脉动环流。平波电抗器 L_d 用于减小电动机电枢电流的脉动，减小电枢电流的断续区，改善电动机的机械特性。系统的控制部分采用了转速和电流的双闭环控制。由于可逆调速电流的反馈信号不仅要反映电枢电流的大小还需要反映电枢电流的方向，因此电流反馈一般用直流电流互感器或霍尔电流检测器，在电枢端取电流信号。为了确保两组整流器的工作状态相反，电流调节器的输出分两路：一路经正组桥触发器 GTF 控制正组桥整流器 VF；另一路经倒相器 AR、反组桥触发器 GTF 控制反组桥整流器 VR。

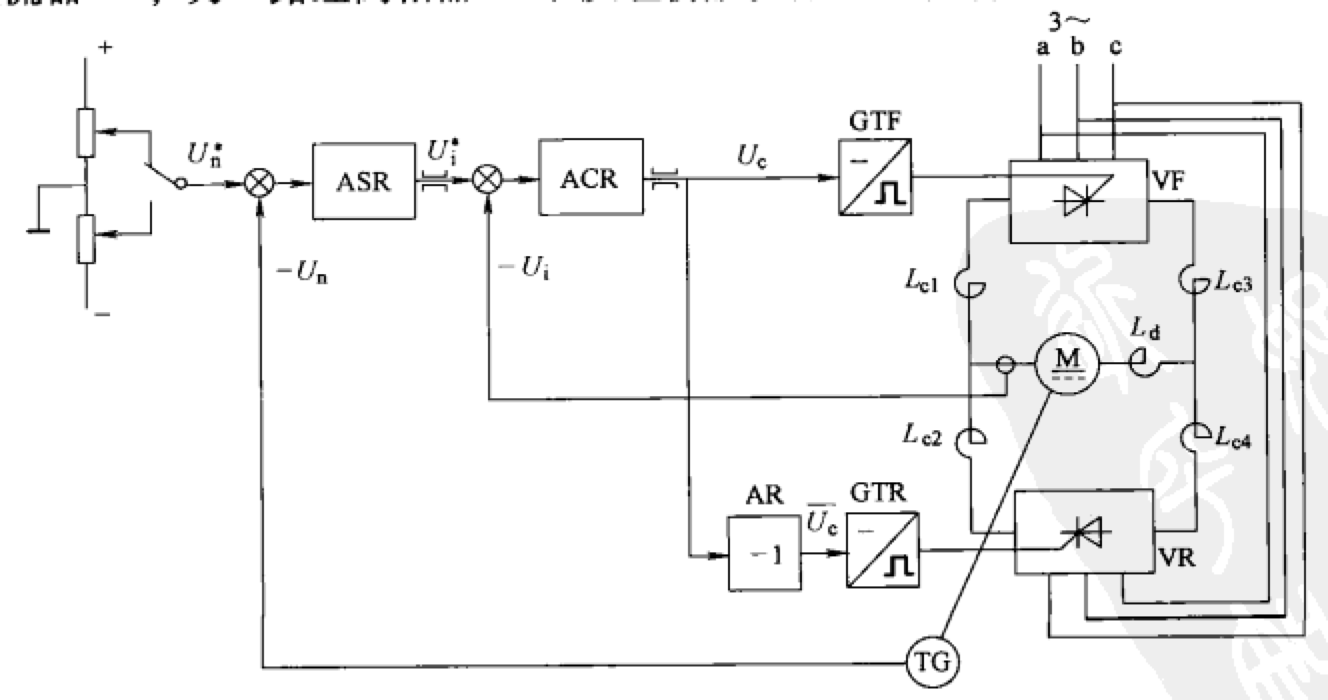


图 6-19 $\alpha = \beta$ 配合控制的有环流可逆调速系统的电气原理图

系统的起动和运行过程与不可逆双闭环调速系统相同，在突加给定信号 U_n^* 为正时，正组桥工作于整流状态，反组桥 VF 工作于逆变状态，由正组桥向电动机提供正向电流，电动机经历电流上升、恒流升速和转速调节三个阶段后，进入正转稳定运行阶段，反组桥 VR 仅有少量脉动环流通过。在突加给定信号 U_n^* 为负时，正组桥工作于逆变状态，反组桥工作于整流状态，由反组桥向电动机提供反向电流，电动机同样经历电流上升、恒流升速和转速调节三个阶段后，进入反转稳定运行阶段，而正组桥仅有少量脉动环流。

可逆系统的特点在反转制动过程，电动机反转需要改变转矩的方向，由 $T_e = C_m \Phi I_d$ 可知，改变转矩方向即需要改变电枢电流的方向，由于电枢回路存在着电感，电枢电流的流向改变则要经历电流的下降和反向电流上升和建立的过程。由于电感是储能元件，电感储能与电流有关 $Q_L = \frac{1}{2} L I_d^2$，因此电流下降就意味着电感储能的释放，电流上升就意味着电感的储能增加。因此电动机的反转制动过程可以分为本桥逆变、反接制动（反向建流）和回馈制动三个主要阶段，现以正转到反转的过程给予说明。

1）本桥逆变阶段。在这个阶段，正转回路的电感释放能量，正向电流下降直到零，电动机转速基本不变。当转速给定由正变负时，转速调节器的输出即电流调节器的输入 U_i^* 改变极性，从而电流调节器的输出 U_C 改变符号，使正组桥从整流改变为逆变状态，反组桥从逆变改变为整流状态，正转回路的电感能量释放，由电感反电动势 $e_L = L_\Sigma \mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 维持电枢正转回路电流的流通，电动机的正向电流下降，电感储能经正组桥（逆变状态）流向交流电源，而反组整流器由于不能通过反向电流，除少量脉动环流外，没有负载电流通过，处于待整流状态。

2）反接制动阶段。当电动机正向电流下降到零后，电感反电动势作用消失，处于整流状态的的反组整流器开始输出电流，电枢电流开始反向，由于整流器输出电压与电动机反电动势的方向相同，电动机处于反接制动状态，电流上升很快。在这个阶段电动机的转速开始下降，反向电流开始上升，正组整流器同样由于不能通过反向电流，除少量脉动环流外，没有负载电流通过，处于待逆变状态，电感的储能开始增加。

3）回馈制动阶段。在反接制动阶段中，由于电流上升很快，当电流反馈大于电流给定值时，电流调节器的输出 U_C 又改变极性，使正组整流器处于整流状态，反组整流器处于逆变状态，这时由于电枢反电动势与整流器输出电压反向相反，且电枢反电动势大于整流器输出电压，这时回路的电流由电枢电动势产生，且经反组整流器（逆变状态）流向交流电源，电动机进入发电回馈制动阶段。这阶段的特点是电动机转速不断下降，电动机的惯性储能经反组整流器回输电网，产生良好的节能效果。随着转速的下降，电枢电动势也不断下降，但由于转速调节器的输出在电动机转速没有反向超调时，始终保持着最大限幅状态，这时电流调节器发挥作用，维持电动机以最大电流回馈制动，即电流调节器的输出随转速的下降而减小，相应晶闸管的控制角不断加大，整流器输出电压随之减小，从而保持最大的制动电流，取得最快的制动效果。

$\alpha = \beta$ 控制的有环流可逆调速方式在实际应用中由于难于准确保持 $\alpha = \beta$ 的状态，一旦出现 $\alpha \neq \beta$ 时，就有可能产生直流环流，使整流器过载或损坏，故实际上并不采用，但研究 $\alpha = \beta$ 控制的有环流可逆系统，对理解直流电动机的正反转和回馈制动过程有很大帮助。下面通过 $\alpha = \beta$ 配合控制可逆系统的仿真，研究直流电动机的可逆过程。

2. $\alpha = \beta$ 配合控制的有环流可逆调速系统的仿真

$\alpha = \beta$ 配合控制的有环流可逆调速系统的仿真模型如图 6-20 所示。

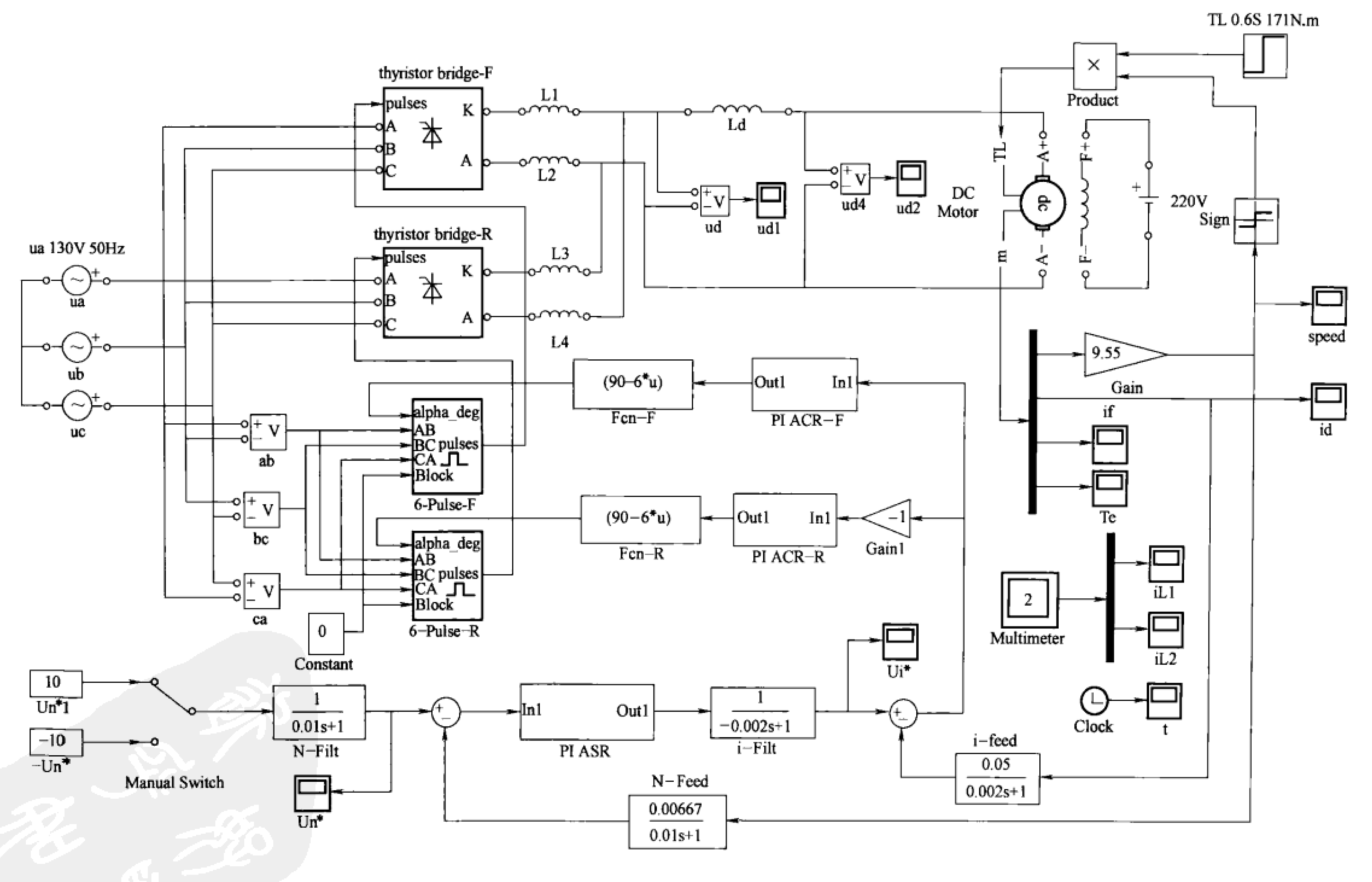


图 6-20 $\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆调速系统的仿真模型

模型中，交流电源（ua、ub、uc）、两组反并联的晶闸管整流器（VF、VR）和触发器（6-Pulse、6-Pulse1）、环流电抗器 Ld1 ~ 4、平波电抗器 Ld 和电动机组成可逆系统的主电路。控制回路由转速给定、转速调节器 ASR、电流调节器 ACR、倒相器 Gain1、移相控制模块 Shifyer1、2 和转速反馈、电流反馈等模块组成。其中给定环节可以通过切换开关（Manual Switch）选择电动机转向，在需要改变转向时，双击该切换开关即可完成正转到反转或反转到正转的给定切换。转速和电流的反馈信号均取自电动机测量单元的输出。转速调节器 ASR 和电流调节器 ACR 由带输出限幅的 PI 调节器分支电路组成（参见图 6-14）。电动机负载为恒转矩负载，且负载转矩随转向改变，因此模型中用 sign 模块判别转向，用 TL（step）模块设置加载时间和负载值。模型的主要参数与图 6-14 系统相同，电抗器参数见表 6-4。

模型的主要参数见表 6-4。

表 6-4　可逆调速系统模型参数

电　源	160V(峰值)50Hz
电动机	$R_a=0.21\Omega$　$L_a=0.00021\mathrm{H}$　$U_f=220\mathrm{V}$　$U_f=220\mathrm{V}$　$R_f=146.7\Omega$　$L_f=0$ $L_{af}=0.84\mathrm{H}$　$J=0.57\mathrm{kg\cdot m^2}$
转速调节器 PI - ASR	$K_{pn}=10.49$　$K_n=1/0.0083=120.5$
电流调节器 PI - ACR	$K_{pi}=2.48$　$K_i=1/0.0268=37.3$
环流电抗器	$L_{d1-4}=0.002\mathrm{H}$

3. 仿真波形和分析

图 6-20 的可逆系统从正转起动到反转过程的转速和电流变化波形如图 6-21 所示。仿真了 8s 的变化过程，其中 0 ~ 2.3s 为系统的正转起动过程，2.3 ~ 0.4s 为系统的加载过程，0.4 ~ 8s 为系统的反转过程。在起动过程中，可以看到系统经历了电流上升、恒流升速和转速调节三个阶段，在转速超调后电流迅速下降并且出现负向电流，这与不可逆调速系统的起动过程不同，因为不可逆调速系统不能产生反向电流，而可逆系统反转整流器可以提供反向电流，并加快起动的调节过程。因为是理想空载起动，起动结束时电枢电流为零。在 2.3s 时电动机加上负载，转速发生波动，并且电流增加，经过 1s 左右时间的调整，系统达到新的平衡状态，转速恢复到 1450r/min，电流上升到 150A。

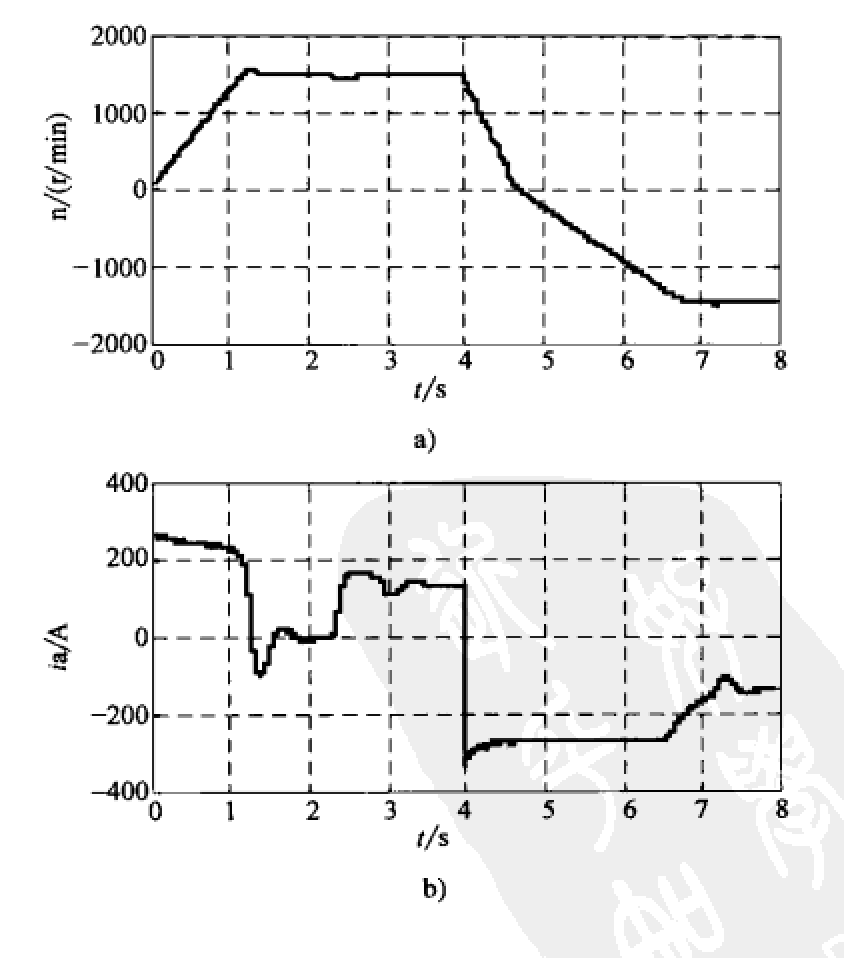


图 6-21　反转过程中的转速和电流波形
a）转速曲线　b）电流曲线

在起动后 4s，转速给定 U_n^* 从“+”切换到“-”，系统进入反转的调节状态。电枢电流迅速改变方向，并从正变到负的最大值，电动机转速也由正变负，系统经历了本桥逆变和反接制动两个阶段，因为电动机是带载反转，反转时转速的上升时间较正转起动（空载）时间长。这两个阶段的放大波

形如图6-22所示。从3.99s反转过程开始到4s时间内，电动机的正向电流下降（见图6-22a），转速没有太大的变化（见图6-22b），平波电感的反电动势为负与电动机电枢反电动势方向相反，且平波电感的反电动势大于电动机电枢电动势（见图6-22c和图6-22d），因此是平波电感储能释放，维持电动机的正向电流，这时仍是正组桥导通，其控制角为β，系统进入了本桥逆变阶段。在4s之后电枢电流开始改变方向，并反方向增加，反组桥进入整流，系统开始反接制动阶段，电动机转速下降。在4.01s左右电流开始反向超调，这时在系统电流环的调节下，反组整流器变为逆变状态，转速和电动机反电动势进一步减小，电动机的惯性储能释放，并经反组整流器流回电网，这是系统的回馈制动阶段。在4.7s转速下降为零时，回馈制动阶段结束，系统又开始反向恒电流起动过程，直到电动机进入反转的稳定运行阶段，读者可以通过仿真波形，更细致地分析系统各阶段工作的特点。

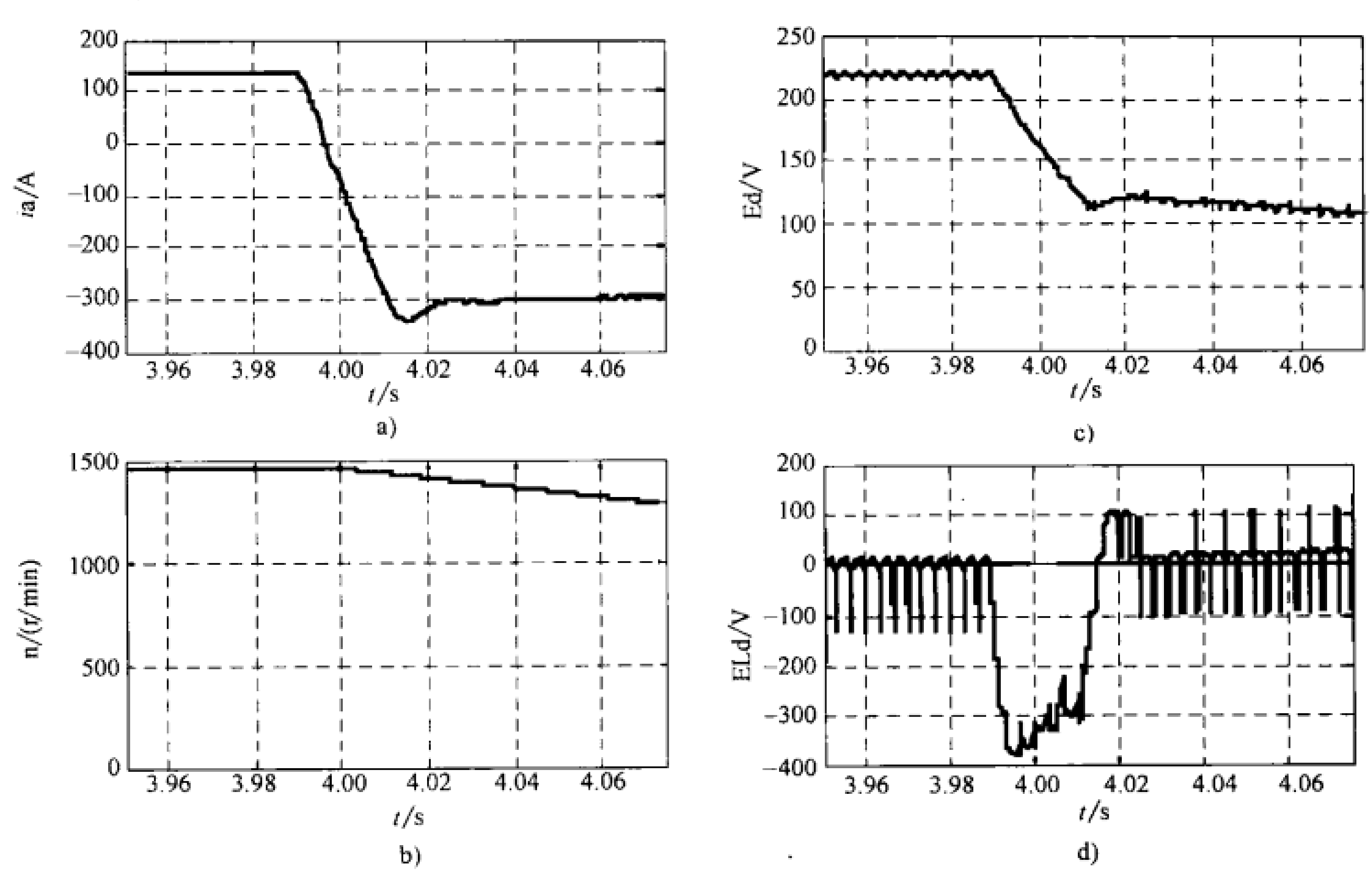


图6-22 本桥逆变和反接制动阶段分析

a）电枢电流 b）电动机转速 c）电动机反电动势 d）平波电感反电动势

图6-23是上述$\alpha=\beta$可逆调速系统的环流分析。其中图6-23a、b分别为正转时3.5～3.56s内正组和反组整流器的输出电压波形，从波形可以看到，两组整流器的输出电压平均值相等，但是电压瞬时值并不相等，在正组电压瞬时值u_f大于反组电压瞬时值u_r时，就可以产生不经过电动机的直流环流。图6-23c为正反组整流器反并联后的电枢支路电压波形，由于限制环流电抗器的均衡作用，该电压$u_d=u_{df}-u_{dr}/2$。图6-23d、e分别为正组和反组整流器的输出电流波形，正组整流器电流中包含了电动机负载电流和环流，反组整流器电流中只有脉动的环流成分，而电动机的电枢电流基本上是平稳的直流（见图6-23f），且$i_d=i_{vf}+i_{vr}$。

图6-23g是电动机从正转起动到反转过程中的转矩/转速曲线（机械特性）。从机械特性可以看到，正反转过程经历了特性的三个象限，其中第一象限电动机工作于正转电动状态，并在起动过程中电动机基本保持了最大转矩的升速；在第二象限电动机转矩变为负，转

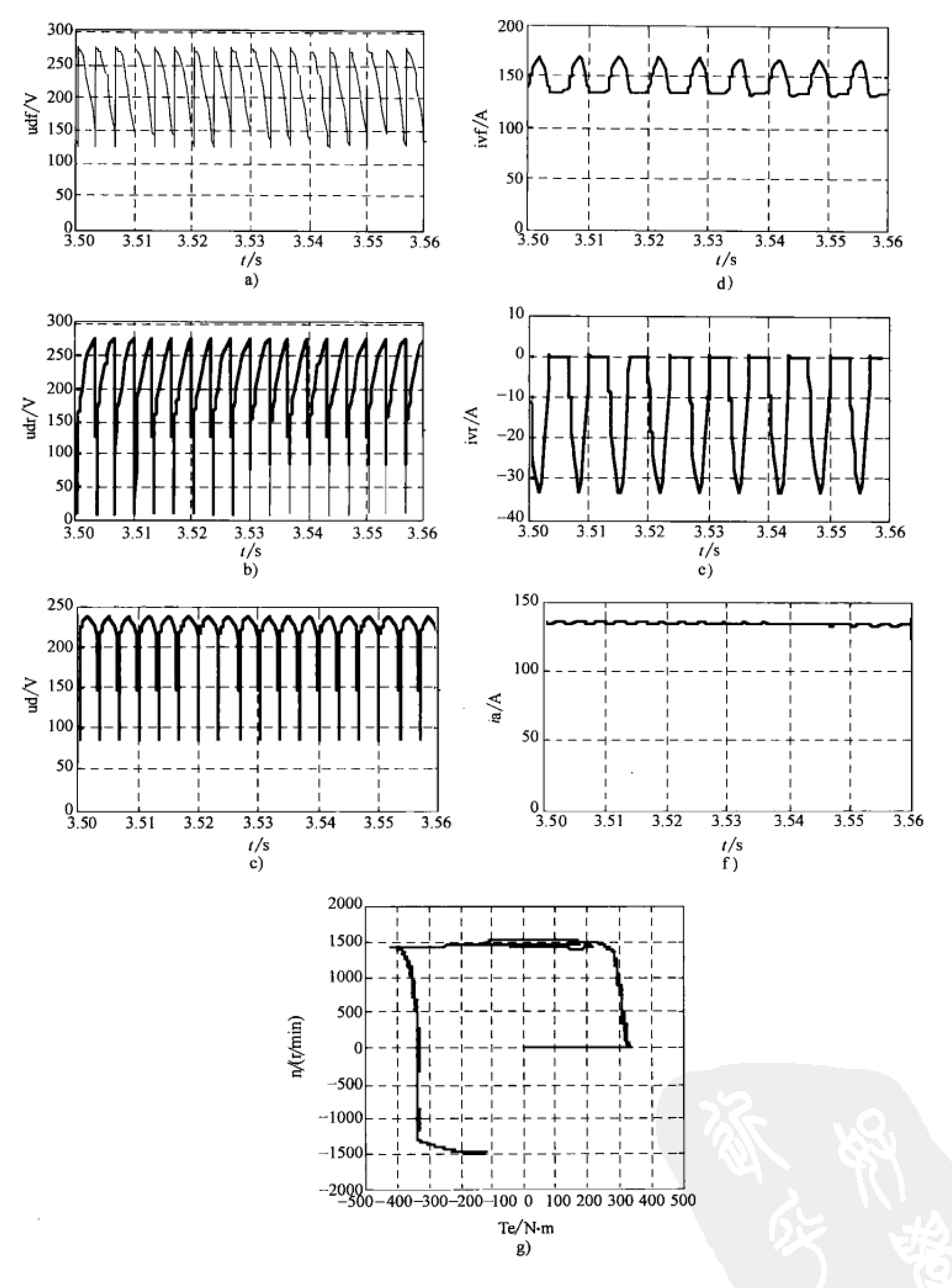


图 6-23　两组整流器的环流和机械特性

a）正组桥输出电压 u_f 波形　b）反组桥输出电压 u_r 波形　c）电枢支路电压 u_d 波形　d）正组桥输出电流 i_{vf} 波形　e）反组桥输出电流 i_{vr} 波形（环流）　f）电动机负载电流 i_d 波形　g）电动机正转到反转过程中的机械特性

速减小，电动机工作于正转发电制动状态，这时电动机转速迅速下降到零；在第三象限电动机以最大反向转矩反向升速，最后稳定在反转工作点上，因为转速转矩均为负，所以电动机工作在反转电动状态。

6.4.2 逻辑控制无环流直流可逆调速系统仿真

在两组反并联供电的直流电动机可逆调速系统中，如果在一组整流器工作时，封锁另一组整流器，即切断这组整流器的触发脉冲，使这组整流器不工作，这样两组整流器之间就没有环流通路，既不会产生直流环流也不会产生脉动环流。这种系统一般由逻辑控制器来判断在正反转或制动过程中哪组整流器应该工作（包括整流和逆变两种状态），哪组整流器应该封锁，故称为逻辑控制无环流可逆调速系统。逻辑无环流可逆系统的思路简洁，并且由于不存在环流和没有环流带来的损耗，整流器的容量可以减小，也不需要限制环流的电抗器，是目前晶闸管-直流电动机可逆系统常用的控制方案。

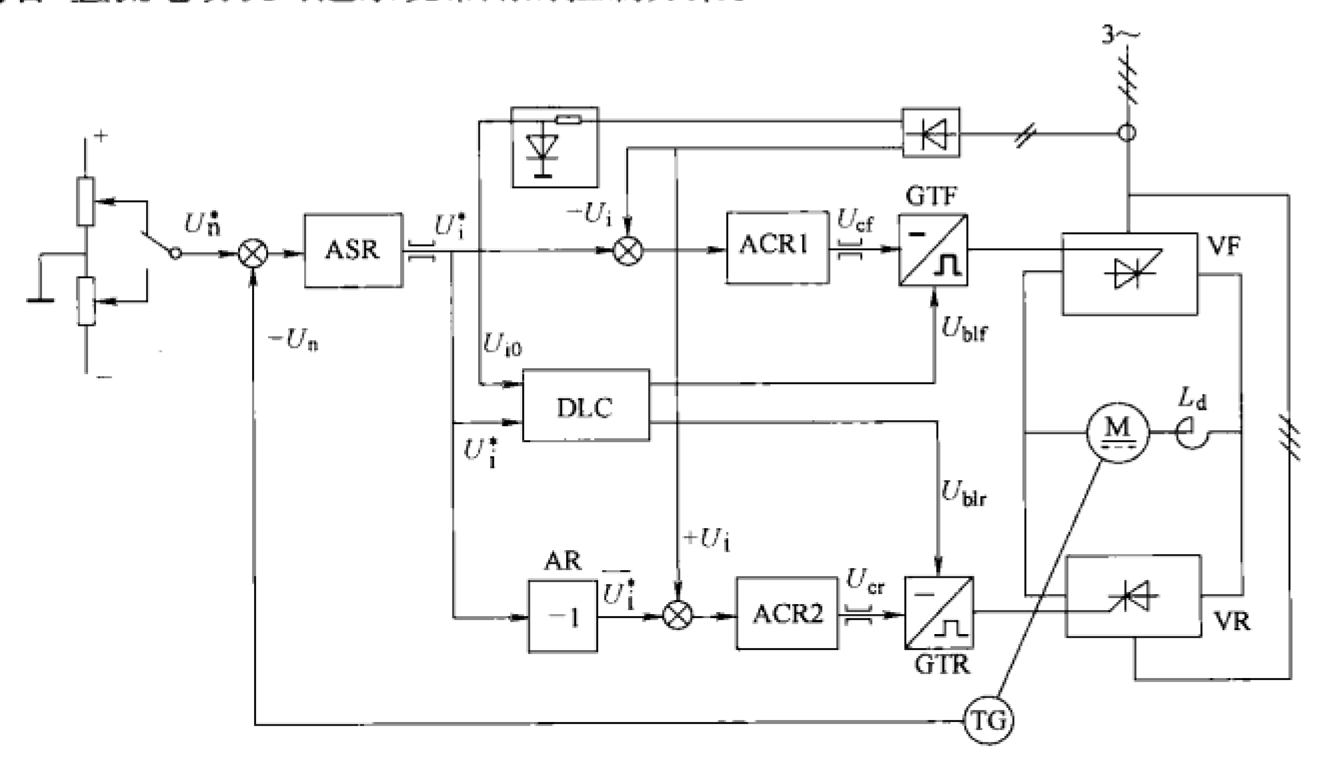


图 6-24 逻辑控制无环流可逆调速系统电气原理图

1. 逻辑控制直流可逆调速原理和仿真模型

逻辑控制无环流可逆调速系统的电气原理如图 6-24 所示。系统主电路也采用两组整流器反并联方案。系统的控制电路由转速调节器、电流调节器、逻辑控制器等组成，且两组整流器分别由两个电流调节器控制，其中反组整流器 VR 的电流调节器 ACR2 输入经过了倒相器 AR，以确保两组整流器的控制角 $\alpha=\beta$。两组整流器的工作或封锁由逻辑控制器控制。

逻辑无环流系统仿真模型如图 6-25 所示，模型的主电路部分基本上与 $\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆系统相同，因为没有环流，因此不设环流电抗器。控制部分的转速调节器 ASR 和两个电流调节器 ACR1、ACR2 由带输出限幅的 PI 调节器打包形成。逻辑控制器 DLC 的输入端分别连接转速调节器的输出 Ui* 和电流的反馈信号 Ui，因为本模型电流反馈取自电动机的电枢电流 ia，因此电流信号可以有正向、反向和零三种状态，而逻辑控制器仅需要判断电枢电流的有无，因此模型中增加了绝对值计算环节（Abs）。控制器输出的整流器切换信号 Ublf 和 Ublr，则分别通过触发模块 pulse 的 Block 端控制该模块是否输出移相触发脉冲，触发模块 Block 端的要求是逻辑控制器输出的信号为“0”时，则该触发器允许输出脉冲，

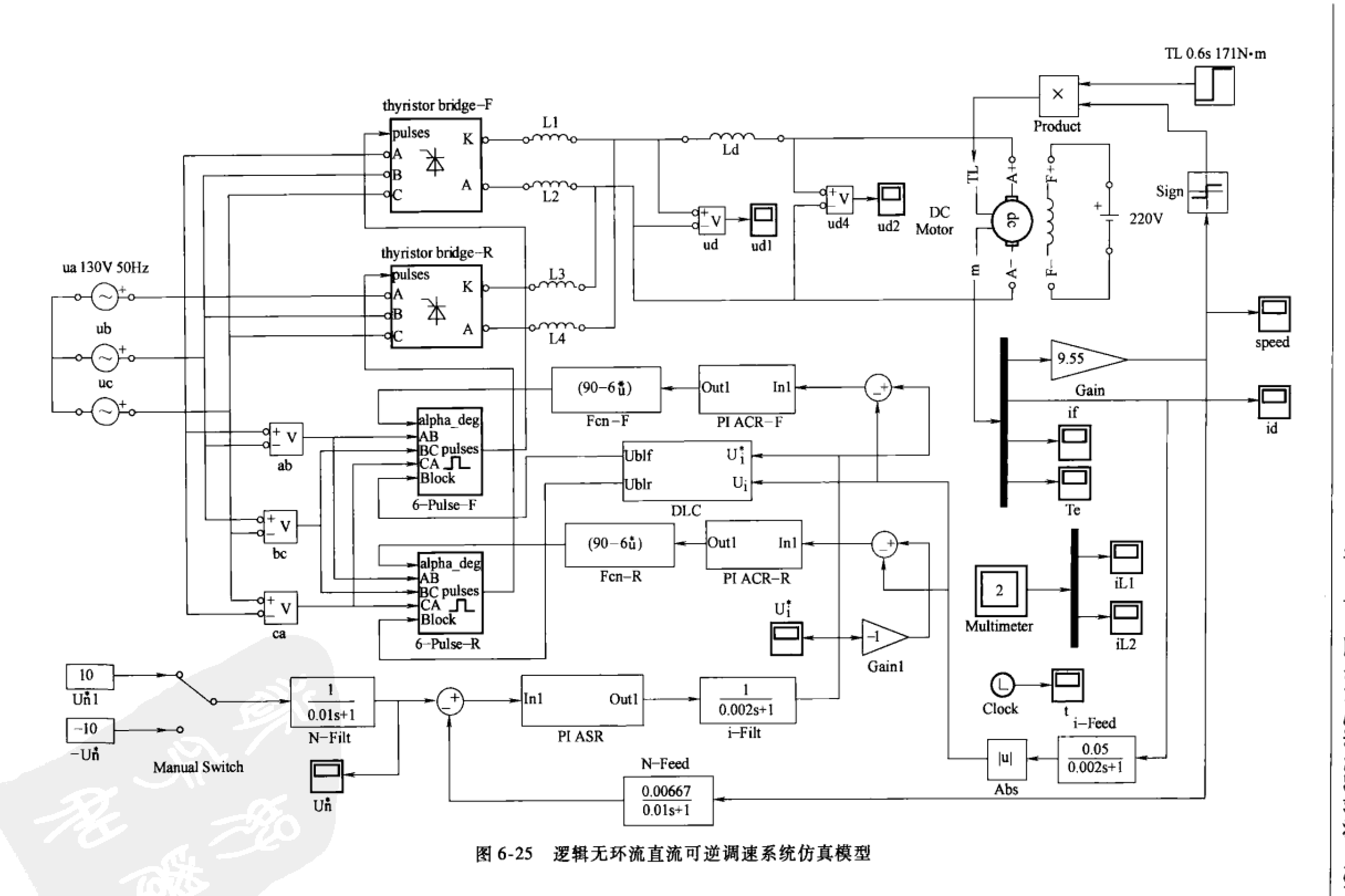


图 6-25　逻辑无环流直流可逆调速系统仿真模型

如果控制器输出的信号为“1”，则该触发器没有脉冲输出。

2. 逻辑控制器

逻辑控制器模块 DLC 是根据控制器输入来判断输出的逻辑状态，可逆调速系统各种运行状态时逻辑控制器输入与输出各量之间的关系见表 6-5。在表 6-5 中归并重复项后，可以得到逻辑判断的真值表（见表 6-6）。

表 6-5　可逆系统各种运行状态时逻辑控制器输入与输出量之间的关系

信号状态 / 运行状态		逻辑控制器输入		逻辑控制器输出		说　明
		电机转矩 Ui*	电枢电流 Ui	正组桥 VF Ublf	反组桥 VR Ublr	
正向起动零电流时		>0	0	0	1	Ui* >0 正向转矩 Ui* <0 反向转矩 Ui = >0 正向电流 Ui <0 反向电流 Ui =0　零电流 Ublf =0　正组桥工作 Ublf =1　正组桥封锁 Ublr =0　反组桥工作 Ublr =1　反组桥封锁
正向起动有电流 正向运行有电流		>0	>0	0	1	
正向制动	本桥逆变有电流	<0	>0	0	1	
	本桥逆变零电流	<0	=0	1	0	
	它桥逆变有电流	<0	<0	1	0	
反向起动零电流		<0	=0	1	0	
反向起动有电流 反向运行有电流		<0	<0	1	0	
反向制动	本桥逆变有电流	>0	<0	1	0	
	本桥逆变零电流	>0	=0	0	1	
	它桥逆变有电流	>0	>0	0	1	

表 6-6　逻辑控制真值表

UT	UI	UF	UR
1	1	1	0
1	0	1	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	0	0	1
1	0	0	1

设计的逻辑控制器如图 6-26 所示。逻辑控制器由电平检测、逻辑判断、延时电路和等 4 个环节组成，图的下角是封装后的逻辑控制器图标。

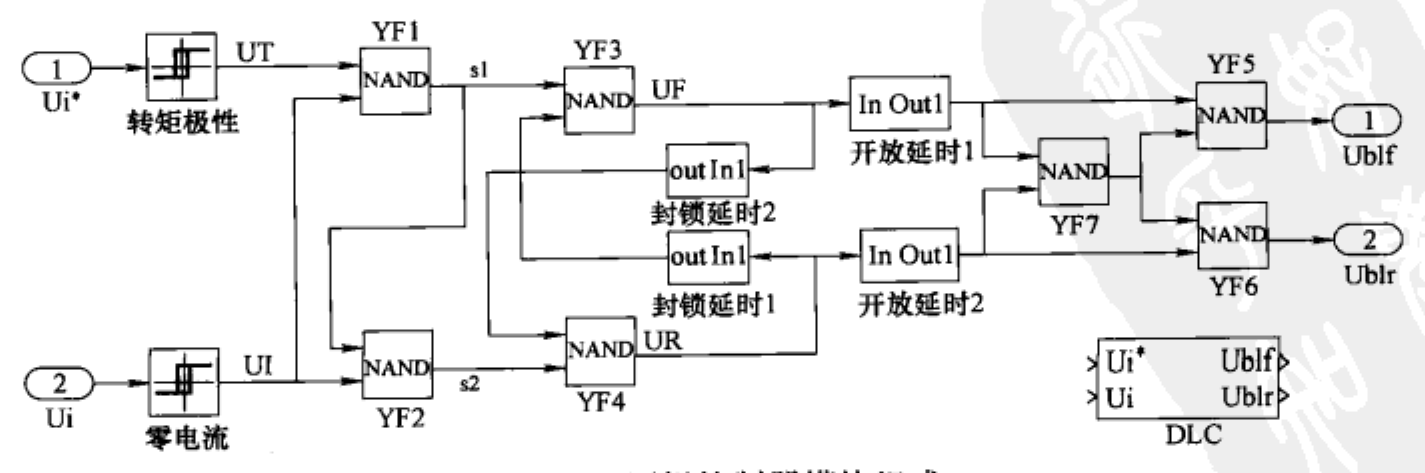
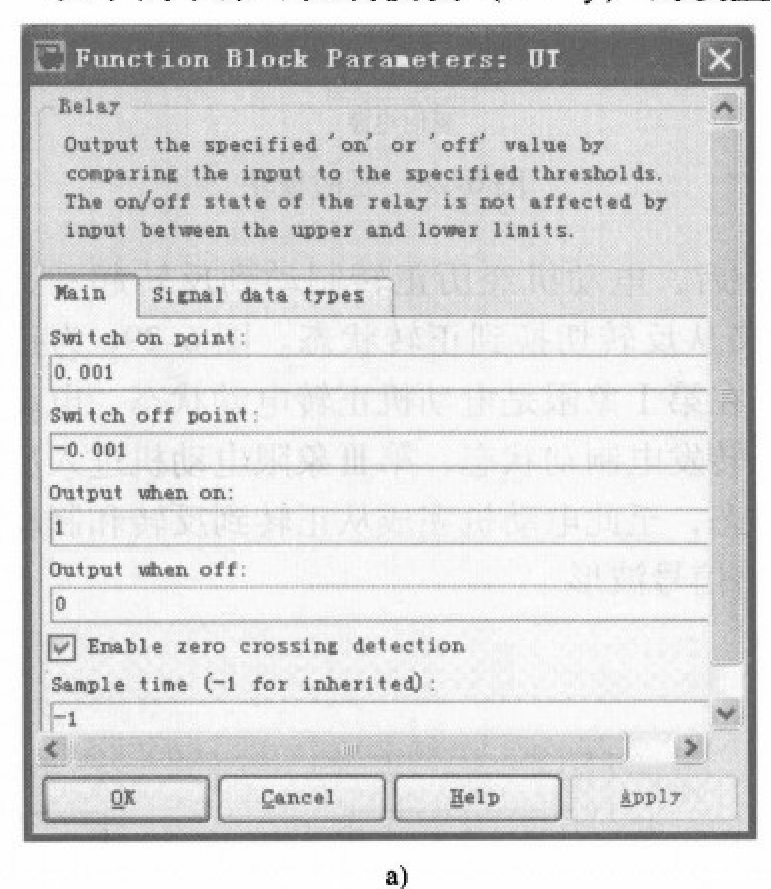


图 6-26　逻辑控制器模块组成

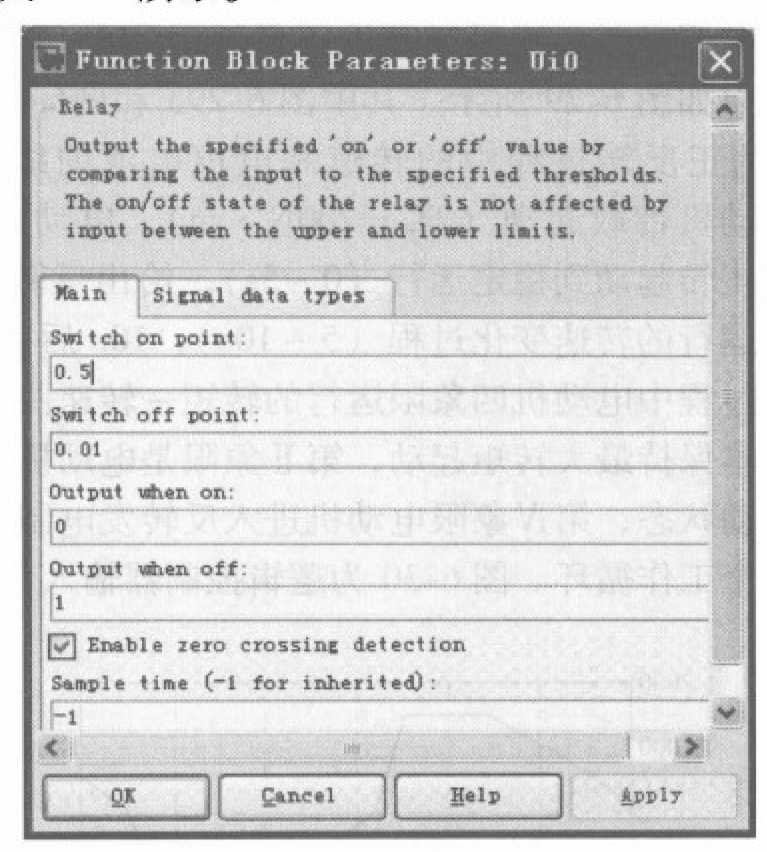
1. 电平检测

电平检测是将输入的模拟信号（Ui*、Ui）转换为数字信号（UT、UI），转换由两个滞环控制模块（Relay）实现，转换的要求是：转矩极性检测：当　Ui*>0时，UT=1；Ui*<0时，UT=0。零电流检测：当有电流时（Ui≠0），UI=0；当电流为零时（Ui=0），UI=0。

在本例中滞环控制模块（Relay）的设置如图6-27所示。



a)



b)

图6-27　电平检测对话框

a）转矩极性检测　b）零电流检测

2. 逻辑判断电路

按表6-3可以得到逻辑控制器输入和输出的逻辑关系表达式为（用与非门实现）：

$$UF=\overline{UR(\overline{UT\cdot UI})}$$

$$UR=\overline{UF[\overline{(\overline{UTUI})UI}]}$$

逻辑判断由与非门YF1～YF4组成，其输入为转矩极性和零电流信号UT、UI；输出为逻辑切换信号UF、UR。

3. 延时电路

逻辑判断电路发出切换指令后还不能立即改变整流器工作状态，因为在检测到电流为零时，电枢电流还不一定真正到零，必须延迟3ms（关断延时）左右，以保证电流真正为零后，才能发出指令，使导通的整流器截止；并且为了确保截止的整流器能恢复阻断状态，需开放的整流器也需要延迟一段时间再开放，即开放延时，一般开放延时取7ms左右。关断延时和开放延时由逻辑控制器中的延时电路产生。由于延时发生在逻辑判断电路输出UF和UR从“0”变“1”时的上升沿，而信号的下降沿不需要延时，因此设计延时仿真模块如图6-28所示。

4. 连锁保护

为了保证正反两组整流器不会发生同时开放，逻辑控制器中由与非门YF5～YF7组成了

连锁保护电路，YF5 和 YF6 采用与非门是为输出 Ublf 和 Ublr 的电平与触发单元 Block 端的电平要求一致。在 UF 和 UR 同时为“1”时，两组整流器都关断，避免发生整流器短路故障。

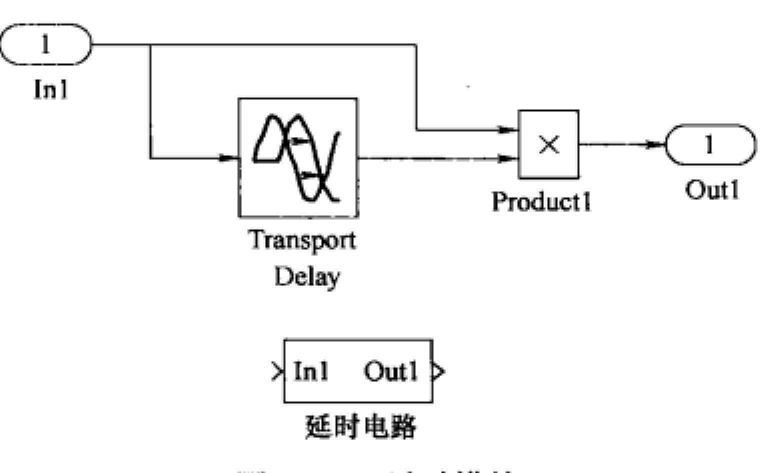


图 6-28 延时模块

逻辑无环流可逆系统正反转过程的仿真结果如图 6-29 所示。其中图 6-29a 和图6-29b 为正反转过程中的转速和电枢电流曲线。电动机带载起动（TL = 200N · m），电动机从正转起动到稳定运行（0 ~ 5s），给出反转指令后，电动机经历正转制动到反转起动、反转运行的转速变化过程（5 ~ 10s），10s 后系统又从反转切换到正转状态。图 6-29c 为正反转过程中电动机四象限运行的转矩 - 转速曲线，在第 I 象限是电动机正转电动状态，电动机基本保持最大转矩起动，第 Ⅱ 象限是电动机的正转发电制动状态，第 Ⅲ 象限电动机进入反转电动状态，第 Ⅳ 象限电动机进入反转发电制动状态，至此电动机完成从正转到反转和制动的一个工作循环。图 6-30 为逻辑控制器输入和输出信号波形。

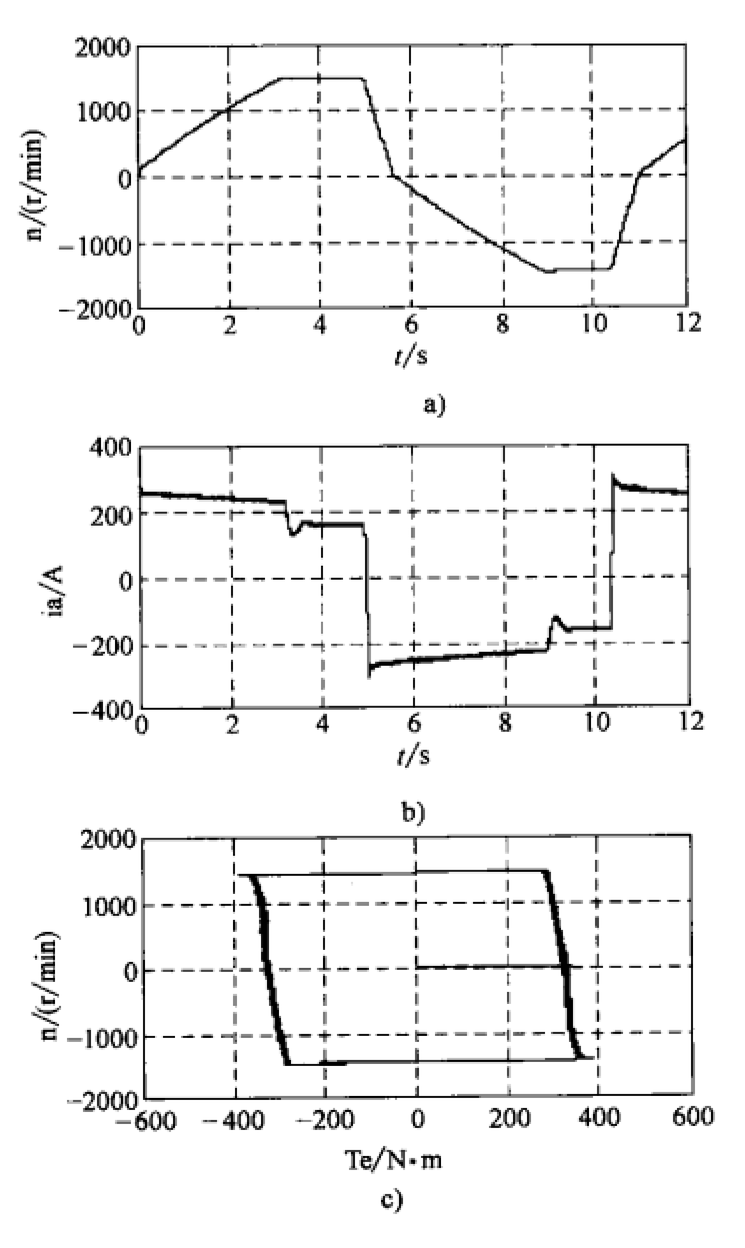


图 6-29 逻辑无环流可逆系统工作情况

a）转速曲线 b）电枢电流波形

c）可逆过程的转矩 - 转速曲线

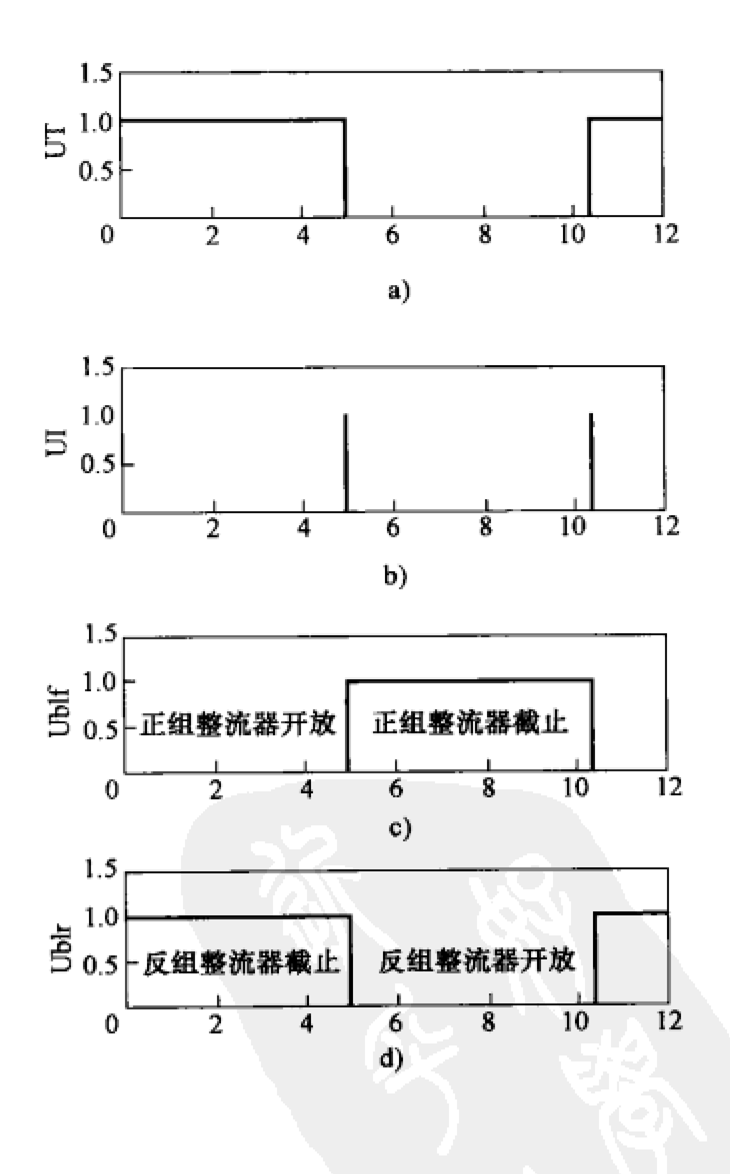


图 6-30 逻辑控制器输入输出信号

a）转矩极性 b）零电流 c）正组触发器控制 Ublf d）反组触发器控制 Ublr

6.5 直流 PWM-M 可逆调速系统

直流 PWM-M 调速系统近年来发展很快，直流 PWM-M 调速系统采用全控型电力电子器件，调制频率高，与晶闸管直流调速系统相比动态响应速度快，电动机转矩平稳脉动小，有很大的优越性，因此在小功率调速系统和伺服系统中的应用越来越广泛。直流 PWM-M 调速系统与晶闸管调速系统的不同主要在变流主电路上，采用了脉宽调制方式，至于转速和电流的控制和晶闸管直流调速系统一样。

直流 PWM-M 调速系统的 PWM 变换器有可逆和不可逆两类，而可逆变换器又有双极式、单极式和受限单极式等多种电路。这里主要研究 H 型主电路双极式的 PWM-M 调速和受限单极式 PWM-M 调速的仿真，并通过仿真分析直流 PWM-M 可逆调速系统的工作过程。

6.5.1 H 型主电路的仿真

直流 PWM-M 调速系统的主电路组成如图 6-31 所示，主电路由 4 个电力场效应晶体管 VT1 ~4 和 4 个续流二极管 VD1 ~4 成 H 型连接组成。当 VT1 和 VT4 导通时，有正向电流 i_1 通过电动机 M，电动机正转；当 VT2 和 VT3 导通时，有反向电流 i_2 通过电动机 M，电动机反转。VT1 ~4 的驱动信号的调制原理如图 6-32 所示，在三角波与控制信号 u_{ct} 相交时，分别产生驱动信号 u_{b1}、u_{b4} 和 u_{b2}、u_{b3}。

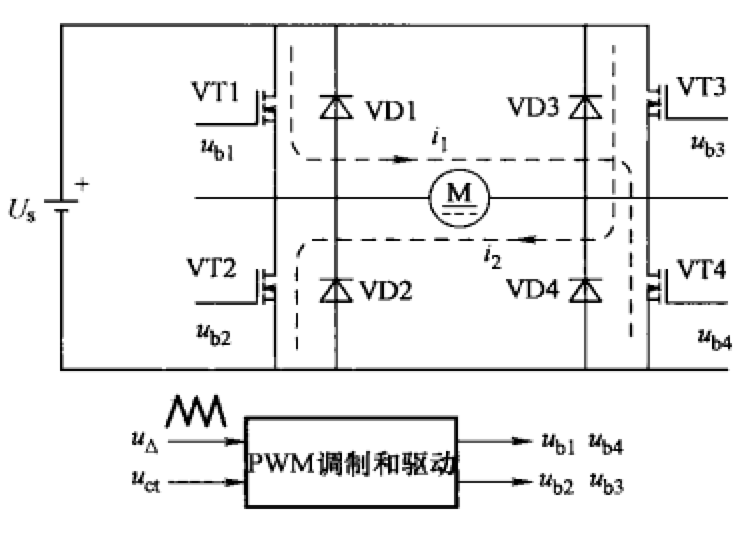


图 6-31 直流 PWM-M 系统主电路

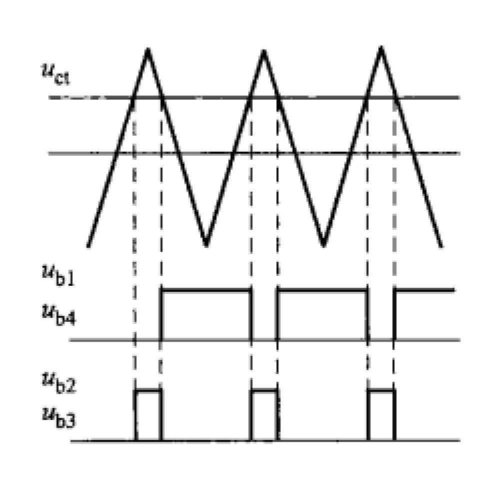


图 6-32 直流 PWM 调制

图 6-31 直流 PWM-M 系统主电路的仿真模型如图 6-33 所示。图中 H 型变流器调用了多功能桥（Universal Bridge)，其参数设为 2 相桥臂，AB 在交流输出端，开关器件为 MOSFET（见图 6-34)。多功能桥模块参数设 ABC 在交流输出端时本来是用于逆变，现在用于直流 PWM 变流时，其驱动电路需要另外设计。设计的双极式驱动控制电路如图 6-35 所示，图中输入端 In1 接脉宽调制信号 Uct，输出端 Out1 输出 4 路 MOSFET 的驱动信号。脉宽调制由两个 PWM 发生器（PWM Generator）模块进行，其中上方的 PWM 发生器产生 VT1 和 VT2 的驱动信号，下方的 PWM 发生器产生 VT3 和 VT4 的驱动信号，为了使 PWM 发生器输出的驱动信号顺序与多功能桥的驱动顺序一致，模型中加入一个选择器模块（Selector)，调整了脉冲序列。因为 MOSFET 有导通和关断时间，为了避免上下桥臂的两个管子同时导通和关断，

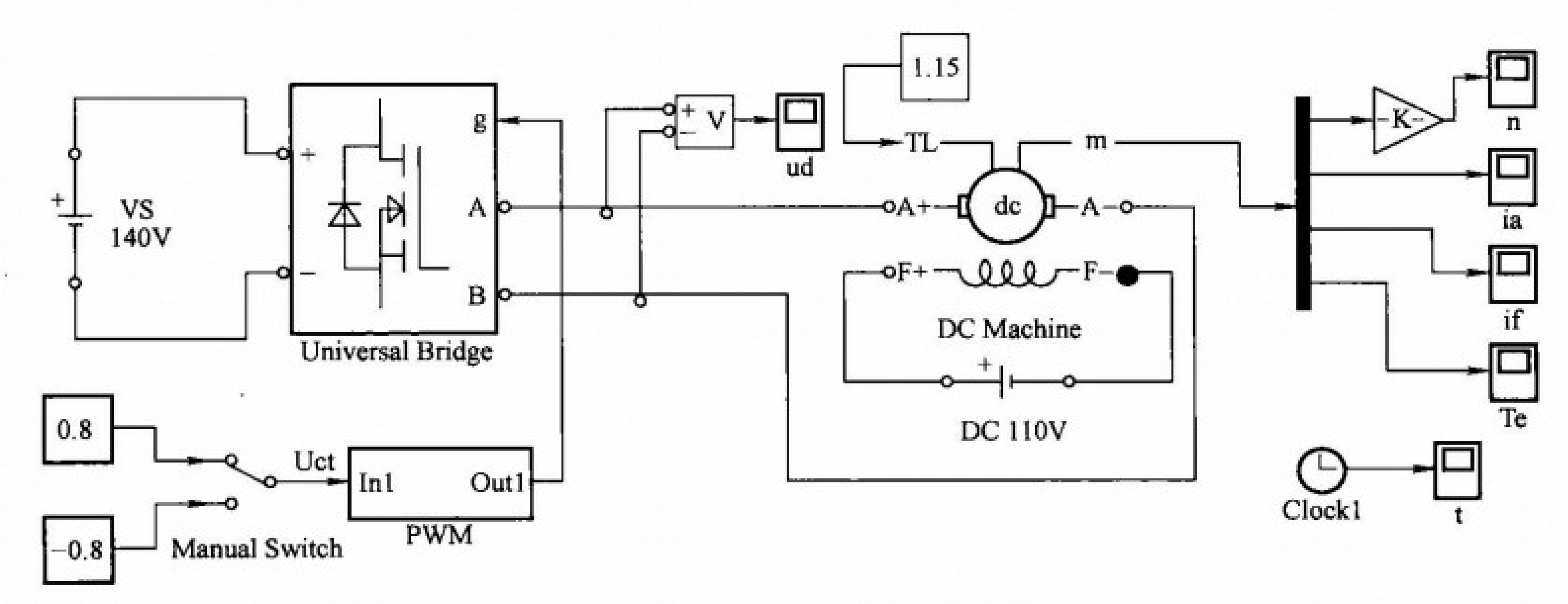


图 6-33 直流 PWM-M 系统仿真模型

造成桥臂的直通现象，需要有“死时”限制，这里采取的办法是使下方的 PWM 发生器输入的控制信号为（Uct + 0.001），即将 Uct 略为抬高，使下方的 PWM 发生器输出信号变窄一些，这样上下管子就不会同时导通和关断。该 PWM 驱动信号发生电路经打包后即形成图 6-33 中的 PWM 分支电路模块。

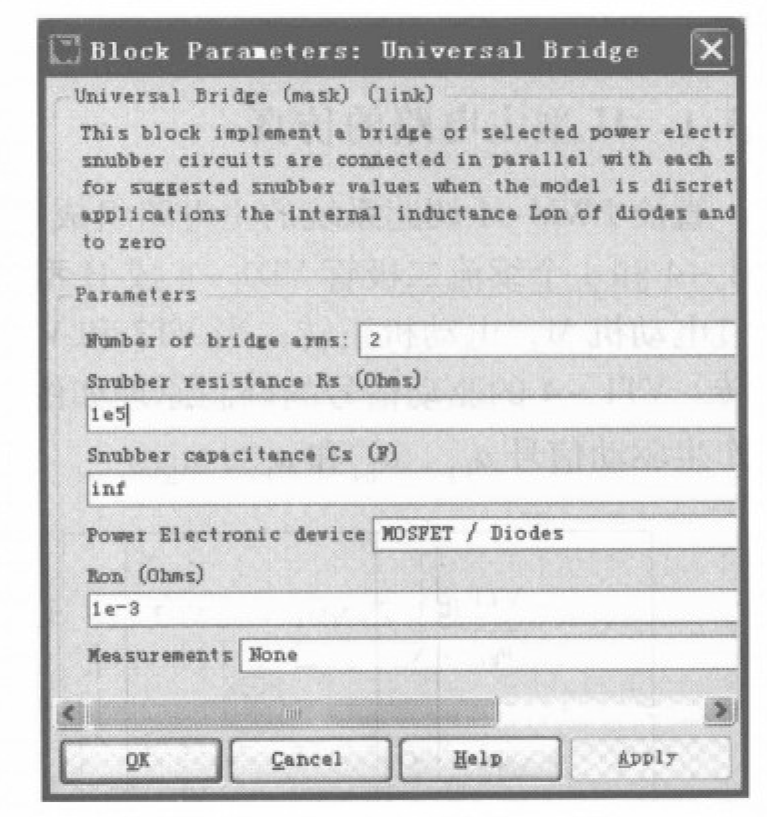


图 6-34 多功能桥参数对话框

在主电路模型中控制信号 Uct 通过互动开关与 PWM 分支电路模块连接，因此双击互动开关模块就可以选择控制信号 Uct 和 – Uct，控制电动机正转或反转。

【例 6-4】 直流脉宽调速系统如图 6-33 所示，伺服电动机参数为：110V，2.9A，2400r/min，电枢电阻 R_a 的值为 3.4Ω，电枢电感 L_a 的值为 60.4mH，转动惯量 0.014kg · m^2，励磁电压 110V，励磁电流 0.5A。仿真该系统在额定负载时的工作情况。

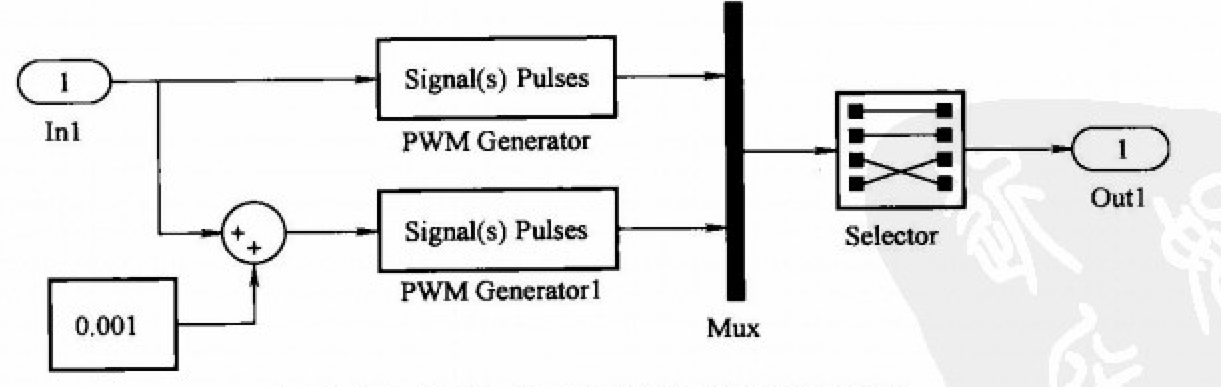


图 6-35 双极式 PWM 驱动信号发生电路

根据伺服电动机参数计算得伺服电动机励磁电阻 $R_f = 220\Omega$，$L_f = 0$，$L_{af} = 0.797\text{mH}$（参见例 6-1）。将电动机参数输入电动机模块对话框。并通过常数模块输入额定负载转矩 T_L：

$$T_L = 9.55C_eI_a = (9.55 \times \frac{110 - 3.4 \times 2.9}{2400} \times 2.9)\text{N} \cdot \text{m} = 1.15\text{N} \cdot \text{m}$$

在直流 PWM 模型中，控制信号 Uct 的取值范围为 0 ~ 1，Uct 也就是双极性 PWM 的调制度 ρ，当取 Uct = 0.8 时，PWM 变流器的直流电源电压

$$U_s = U_n/\rho = (110/0.8)\,\text{V} = 140\text{V}$$

直流 PWM 模型按上述额定参数仿真的结果如图 6-36 所示，其中图 6-36a 为变流器输出电压的一部分（1 ~ 1.01s），电压波形呈良好的矩形波，如果不设一定的“死时”，由于上下桥臂管子的换流重叠现象，使输出电压呈梯形。图 6-36b 为输出电压的平均值，输出电压略高于 110V。图 6-36c 是伺服电动机的转速响应，转速上升平稳，这是 PWM 调制的特点。图 6-36d 显示了电动机起动过程中的电流曲线，起动电流最大值为 28A，约为额定电流的 7 倍。

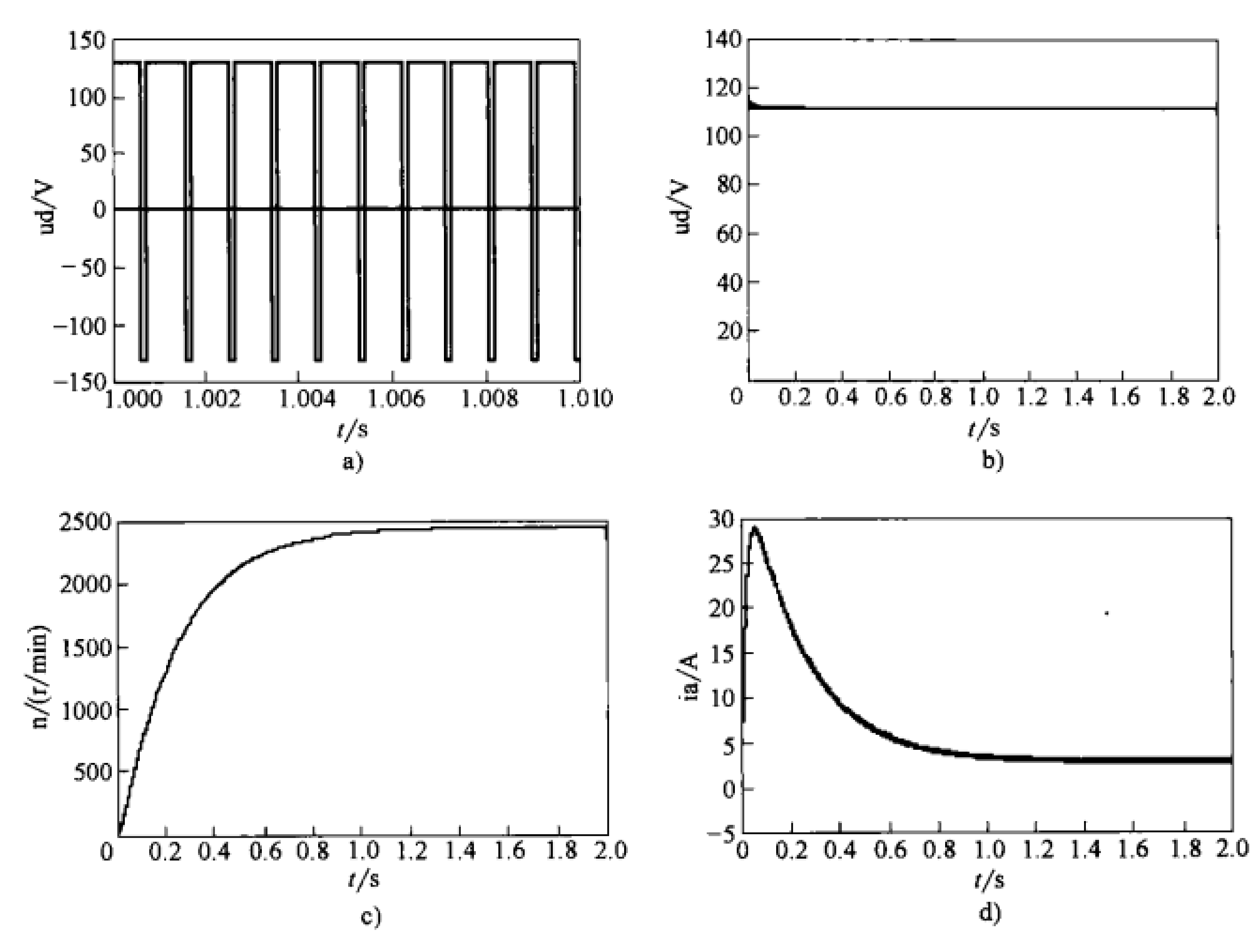


图 6-36　直流 PWM-M 系统响应曲线

a) PWM 变流器输出电压（瞬时值）　b) PWM 变流器输出电压（平均值）　c) 电动机转速　d) 电动机电枢电流

6.5.2　双极式控制直流 PWM-M 可逆调速系统仿真

双极式控制直流 PWM-M 可逆调速系统的仿真模型如图 6-37 所示，模型在直流 PWM-M 系统主电路模型（见图 6-33）基础上增加了转速调节器 ASR 和电流调节器 ACR，ASR 和 ACR 都采用带输出限幅的 PI 调节器（参见图 6-14）。调节器参数取值见表 6-7。模型的其他设置与【例 6-4】相同，仿真算法采用 ode23tb。

双极式控制直流 PWM 可逆系统的仿真结果如图 6-38 所示。从图中可以看到系统从正转起动至反转运行过程中，转速（见图 6-38b）和电枢电流（见图 6-38c）对转速给定 U_n^*（见图 6-38a）的响应波形。在仿真中取电流的过载倍数 $\lambda = 3$，因此电动机的正转起动和制动、反转起动过程中始终保持着最大电流 12A 左右。在正反转转速达到额定值 2400r/min 后，电流下降为 4A 左右。图 6-38d 为转速调节器输出，即电流的给定信号 Ui*。图 6-38e

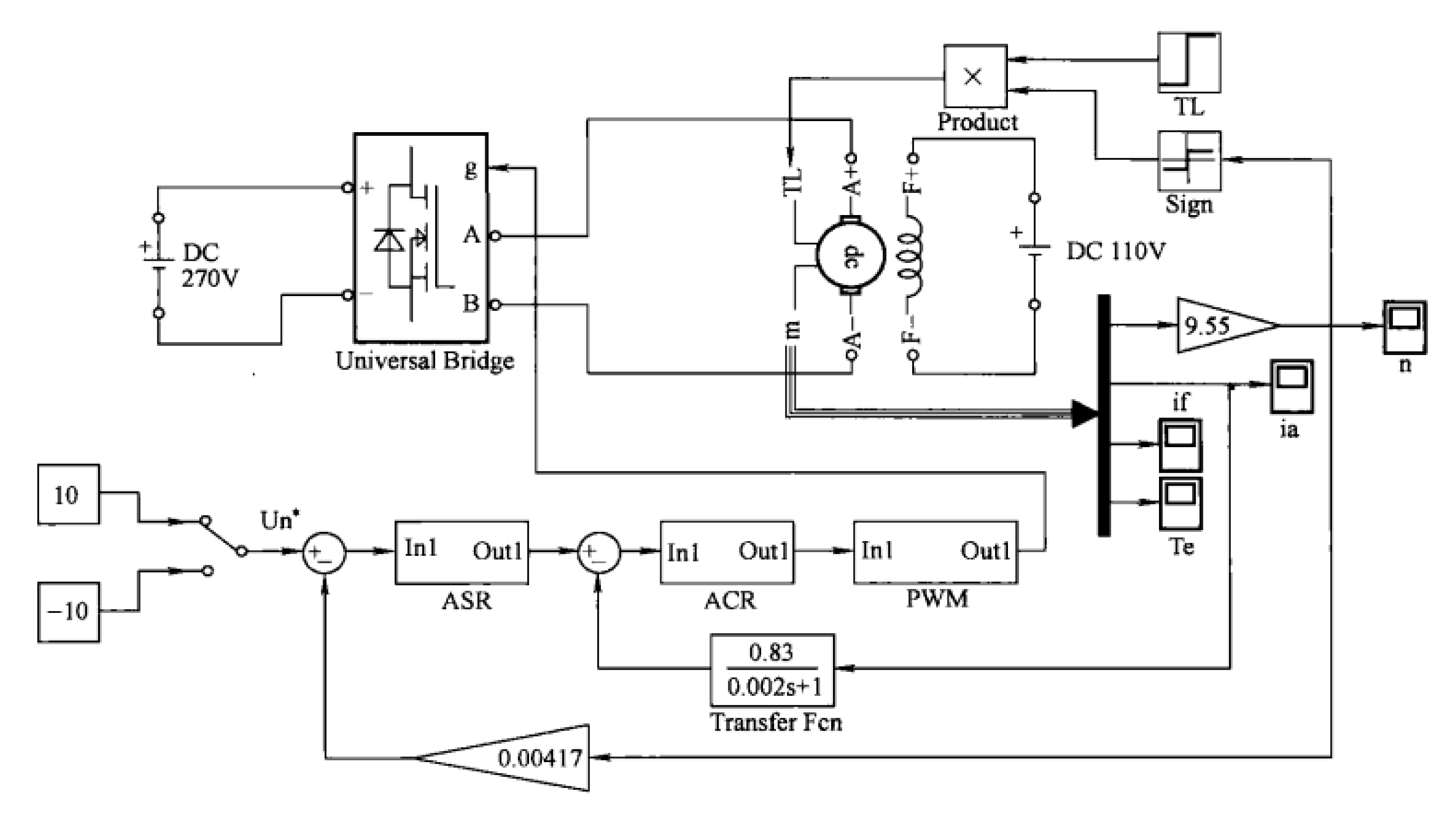


图 6-37　直流 PWM-M 可逆调速系统仿真模型

表 6-7　直流 PWM 可逆系统调节器参数

参　　数	转速调节器 ASR	电流调节器 ACR
放大倍数 K_P	$K_{Pn}=23.5$	$K_{PI}=35.6$
积分时间常数 K_I	$K_n=0.52$	$K_I=0.003$
调节器输出限幅	±10	±0.98
转速反馈系数 α	Alpha = 0.00417	
电流反馈系数 β		Beta = 0.83

为电流调节器的输出信号 Uct，图 6-38f 为 Uct 信号的局部展开，Uct 的波动反映了电流调节器的调节作用，不同电流调节器参数 Uct 的波动情况不同，Uct 的变化使变流器的脉宽随之调整，输出电压值也随着变化，使电流保持不变。

6.5.3　受限单极式直流 PWM-M 可逆调速系统仿真

受限单极式直流 PWM 与双极式控制不同是 H 桥的 4 个开关管 VT1 ~4（见图 6-31）的的工作方式，双极式控制 VT1、VT4 和 VT2、VT3 成对导通。受限单极式控制在正转时 VT1 起 PWM 调速控制作用，VT4 始终处于导通状态，而 VT2、VT3 关断，在反转时 VT2 作 PWM 控制，VT3 始终处于导通状态，而 VT1、VT4 关断。因此在正反转中，H 桥的 4 个开关管中只有一个管子（VT1 或 VT2）处于 PWM 开关状态，其他三个管子状态不变（恒通或恒关断），这样不仅避免了 H 桥上下桥臂开关管的直通可能，也减少管子的开关损耗，所以受限单极式是直流 PWM-M 调速系统常用方案。

受限单极式直流 PWM-M 可逆调速的仿真模型如图 6-39 所示，模型与双极式控制模型（见图 6-37）基本相同，不同在于控制器 PWM。受限单极式模型的控制器 PWM 结构如图 6-40 所示，控制器有两个输入端，其中 In1 来自电流调节器，另一个输入端 In2 连接转速给

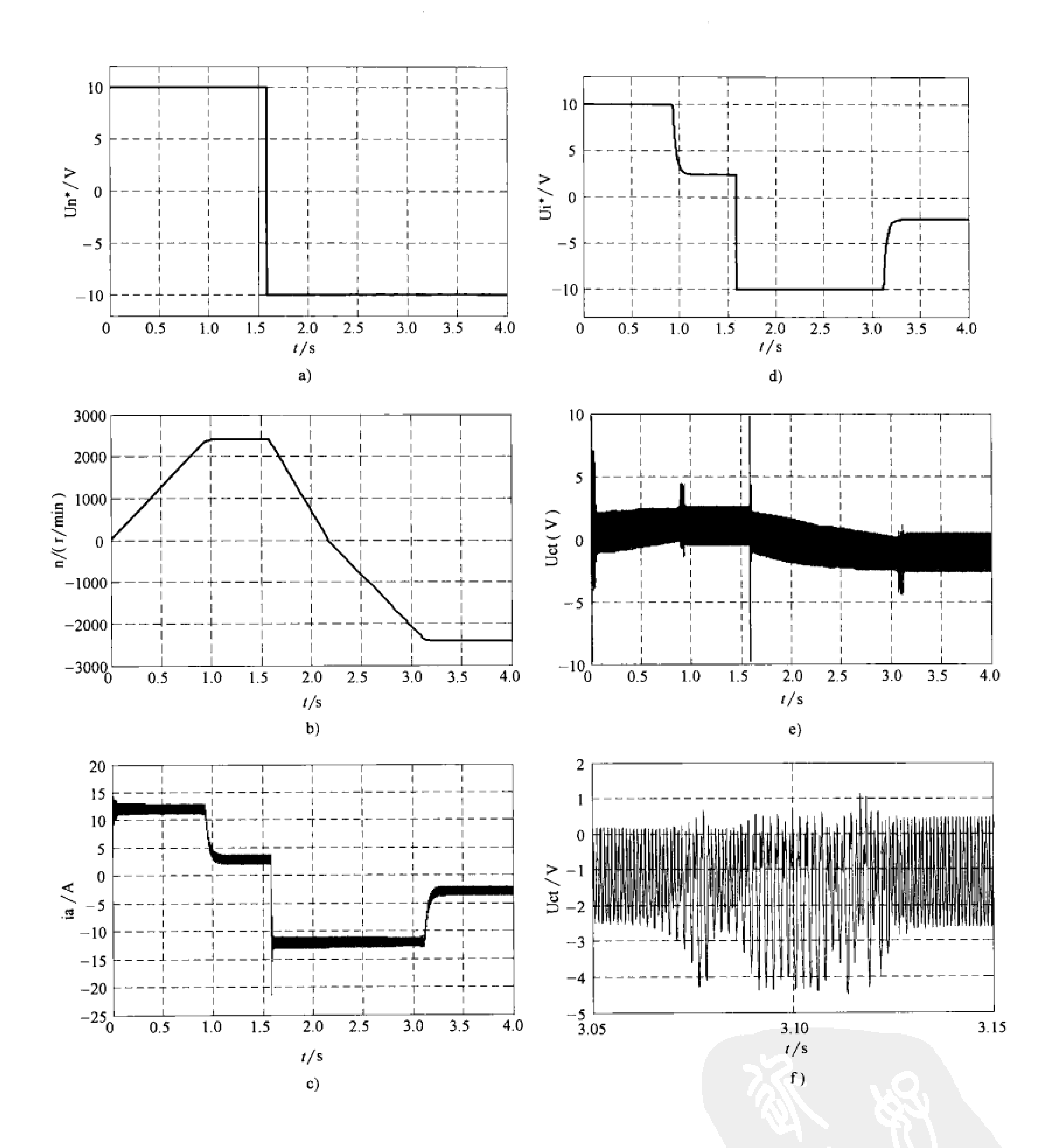


图 6-38　直流 PWM 可逆系统仿真结果

a）转速给定　b）伺服电动机转速　c）电动机电枢电流　d）电流给定

e）电流调节器输出（一）　f）电流调节器输出（二）

定，两个比较器 Compare To Zero 用于判断转速给定的方向，当转速给定信号满足比较条件时，Compare To Zero 输出为“1”，该“1”信号控制触发器（Enabled System1 或 Enabled System2），使 PWM Generator 输出的脉冲可以通过，分别触发开关器件 VT1 和 VT2。并且在

转速给定为正时，比较器 Compare To Zero 输出为“1”，使 VT4 导通，在转速给定为负时，比较器 Compare To Zero 输出为“0”，VT4 处于关断状态；比较器 Compare To Zero1 的作用与此相同，用于控制 VT3 的通断。模型的参数与双极式控制模型的参数相同，仿真算法为 ode45。

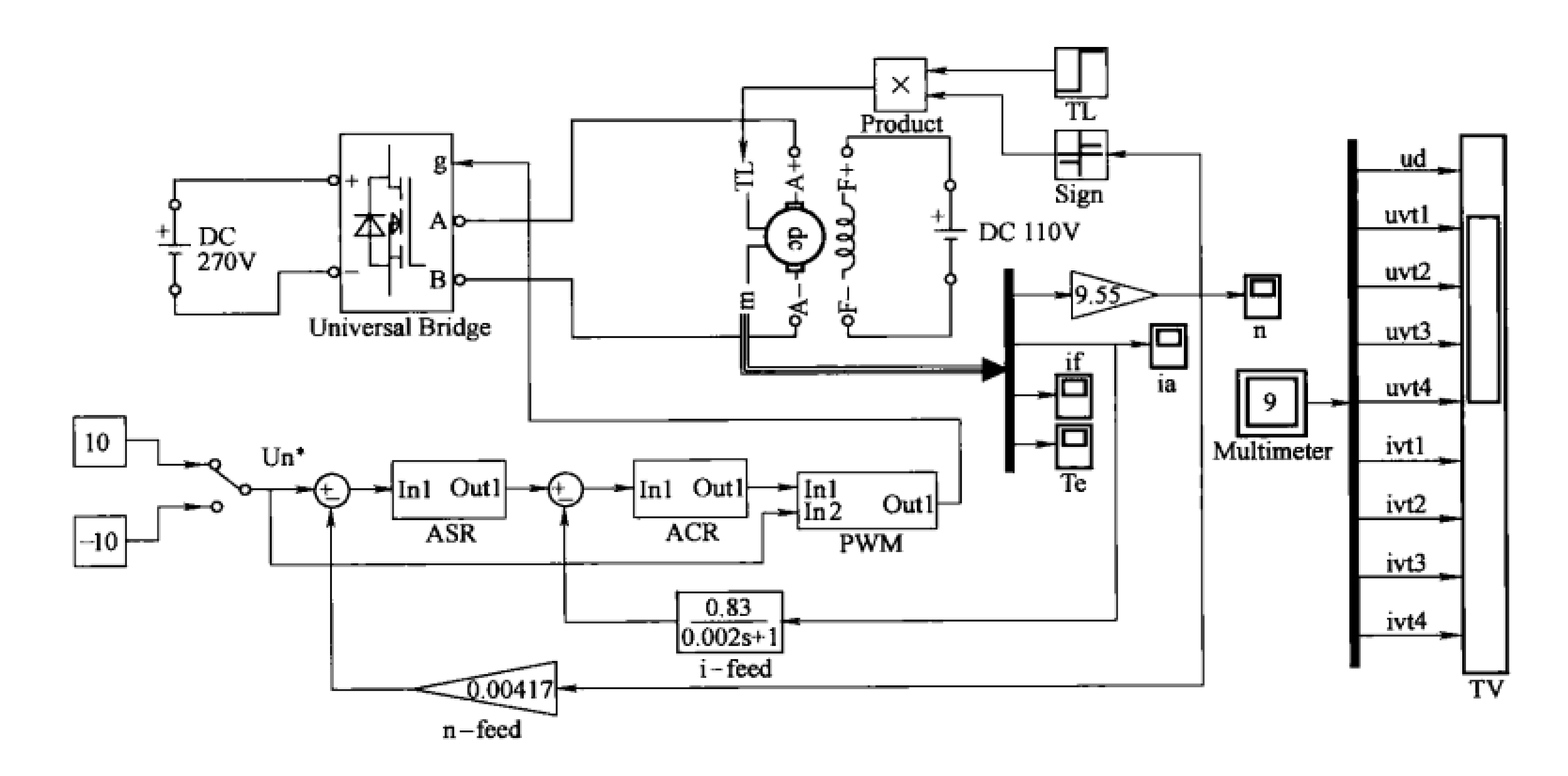


图 6-39 受限单极式直流 PWM-M 可逆调速系统模型

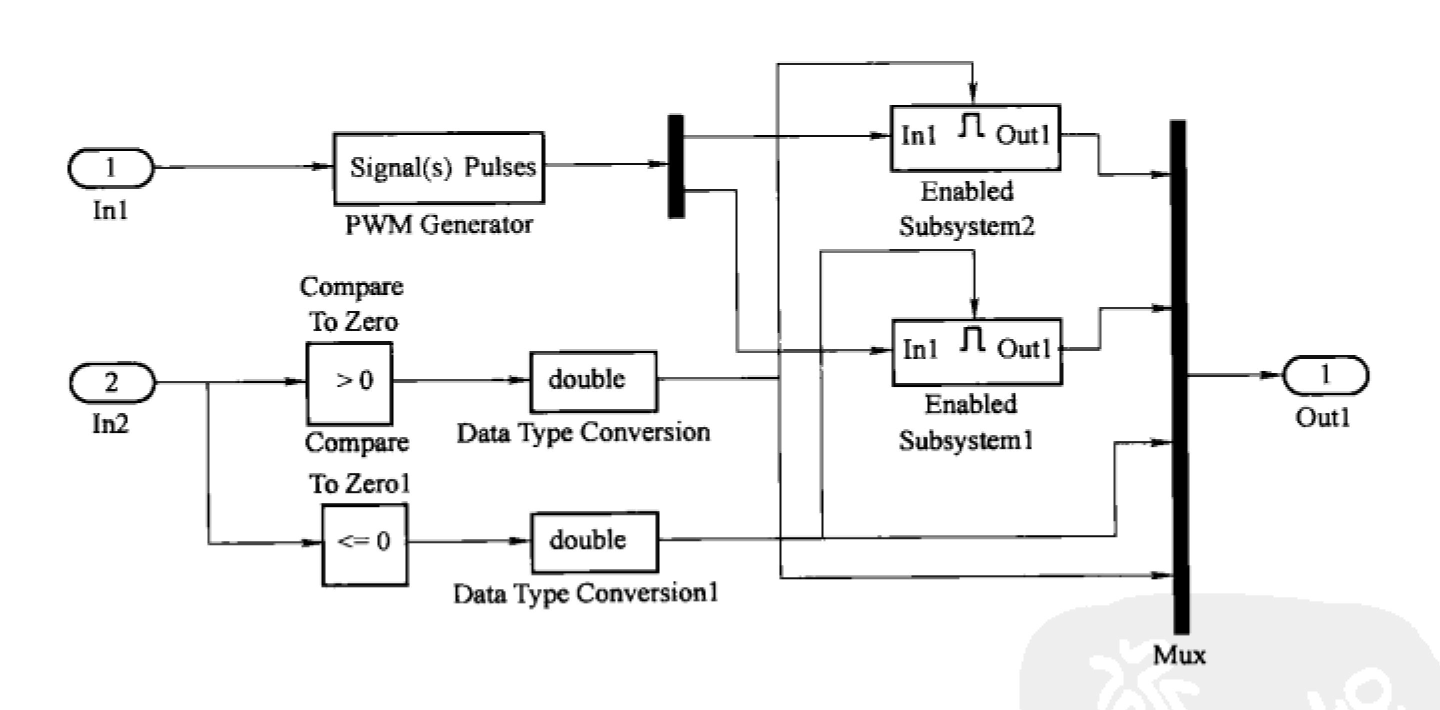


图 6-40 受限单极式 PWM 结构

图 6-41 为电动机从正转到反转过程中电动机的转速和电压电流曲线，图中电压和电流为平均值。图 6-42 为正转到反转过程中 H 型桥 4 个开关器件的电流波形，图 6-42a 中，时间 2s 前的正向电流是正转时通过 VT1 的电流，2s 后的电流是反转时通过二极管 VD1 的续流电流。图 6-42b 中时间 2s 前的反向电流是正转时通过 VD2 的续流电流，2s 后的电流是反转时通过 VT2 的电流。图 6-42d 反映了正转时 VT1 导通有电流通过，反转时 VT4 关断没有电流，图 6-42c 则反映反转时 VT3 的工作情况。

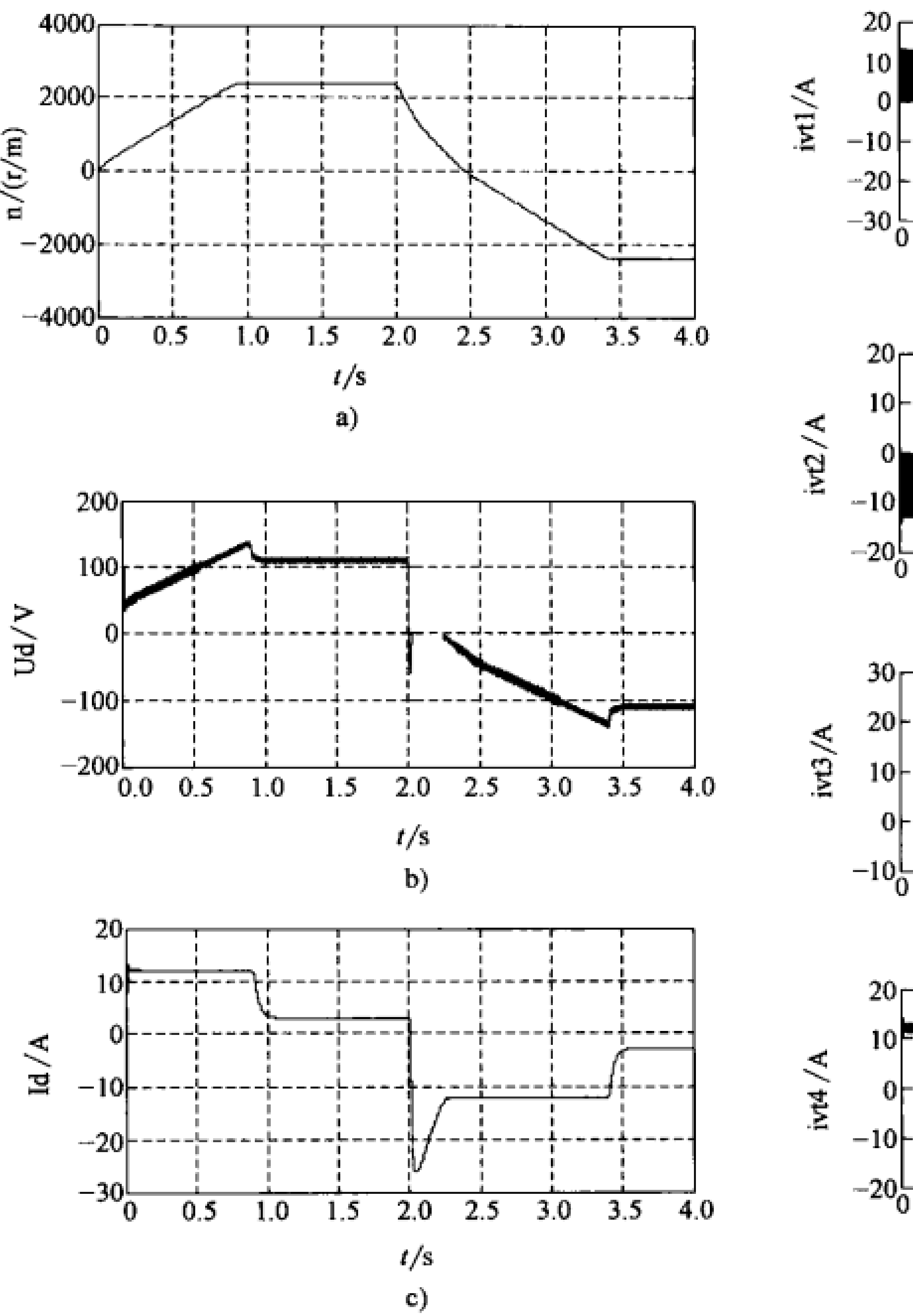


图 6-41　受限单极式控制电动机特性

a）电动机转速　b）电枢电压　c）电枢电流

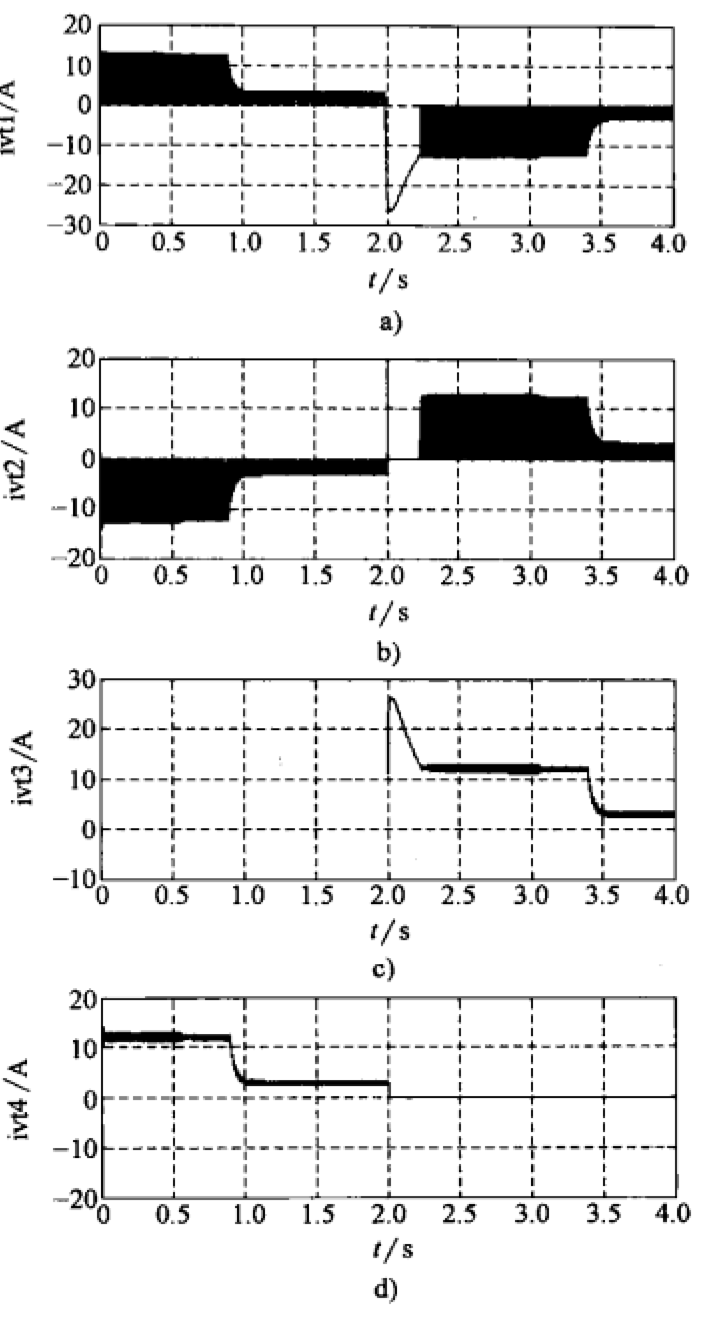


图 6-42　开关器件电流波形

a）VT1 和 VD1　b）VT2 和 VD2　c）VT3 和 VD3　d）VT4 和 VD4



第7章 交流调速系统的仿真

自20世纪80年代以来，交流调速发展很快，交流电机具有维护简单、体积小、重量轻等特点，随着电力电子交流调压、变频和控制技术的日趋成熟，交流调速在应用中越来越普遍。本章主要通过仿真研究交流调速的性能和控制问题。

7.1 交流异步电动机性能的仿真研究

本节通过仿真研究交流异步电动机的特性，首先介绍笼型交流异步电动机在正弦电压下的工作情况，然后介绍异步电动机在变频器供电时的工作情况。

7.1.1 异步电动机连接正弦电压工作

异步电动机由正弦电压直接供电是最常见的工作方式，使用最广泛，仿真这种工况可以对异步电动机的特点有更深的理解。正弦电压直接供电的异步电动机模型如图7-1所示。模型中三相电动机模型（Asynchronous Machine）连接三相正弦电源（ua，ub，uc），电动机负载由常数模块TL设定，电动机参数通过电动机测量模块（Machines Measurement Demux）测量，通过示波器观测电动机定子三相电流（isa，isb，isc）、转子三相电流（ira，irb，irc）、转速speed和转矩Te，并且由XY图示仪（XY Graph）观测电动机的机械特性（Te-n特性）。模型参数见表7-1。

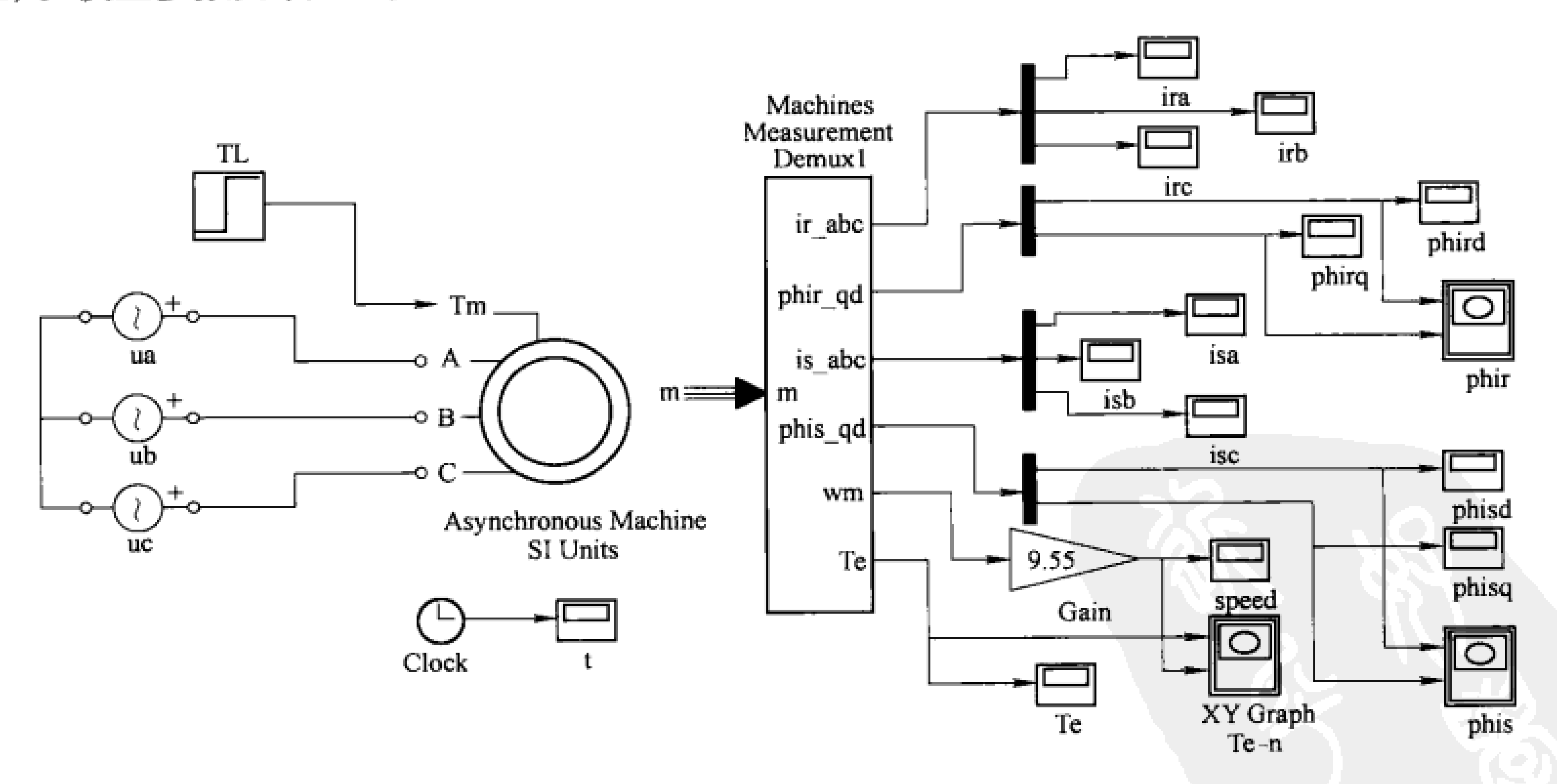


图7-1 异步电动机特性研究模型

电动机在额定电压下空载起动时的波形如图7-2所示，从波形图7-2d中可以看到，起动时电动机转速迅速上升，在0.2s后达到稳定转速1500r/min，若0.5s时给电动机加上负载

表 7-1　异步电动机特性研究模型参数

三相电源			
电压	220V	频率	50Hz
电动机(容量 Pn = 4.7e3kW)			
电压 Un	380V	频率 fn	50Hz
定子绕组电阻 Rs	0.68Ω	定子绕组漏感 Lls	0.0042H
转子绕组电阻 Rs	0.45Ω	转子绕组漏感 Lls	0.0042H
互感 Lm	0.1486H	转动惯量 J	0.05kg · m^2
摩擦系数 F	0.0081	极对数 p	2
负载设定 T_L			
加载时间	0.5s	加载值	132
仿真参数			
算法	Ode23t	相对误差	10^{-5}

图 7-2　异步电动机工作波形
a）定子电流　b）转子电流　c）电动机转矩　d）电动机转速　e）机械特性

132N · m，电动机转速下降，转差变大，在 1.45s 时转速下降为 0，因为该负载远大于电动机的额定负载 40N · m，1.45s 后电动机转速变为负值，这时相当于电动机带位能负载，负载过大引起电动机反转的工作情况（倒拉反接工作状态）。在电动机起动到空载运行和过载过程中，电动机的定子电流和转子电流波形如图 7-2a 和图 7-2b 所示，在起动中随转速上升

定子电流减小，在0.5s加载后定子电流迅速增大，定子电流为50Hz的正弦波。转子电流的变化与定子电流相同，但是从转子电流的波形可以看到，转子电流的频率随电动机转差而变化，在起动过程中随转速上升转差变小，转子电流频率下降，当电动机达到理想空载转速1500r/min时，转子电流的大小和频率都为0，加载后随转速的下降和反向后转差变大，转子电流的频率又增加。图7-2c是电动机的转矩响应，起动中交流电动机的转矩是有波动的，在严重过载引起电动机反转时，电动机产生的转矩很小（1.4s后）。图7-2e是电动机的动态机械特性，其中A点是电动机空载转速达到同步转速时的工作点，加载后，工作点从A移向B，B点对应电动机的最大转矩，是机械特性的转折点，之后转速继续下降，特性进入不稳定区。

图7-3为电动机在上述工作过程中电动机定子和转子的磁链轨迹，其中图7-3a是定子磁链轨迹，起动时定子磁链从0开始建立，然后不断增大并旋转，在正弦电压下电动机达到稳定转速后定子磁链的轨迹是一个圆。转子磁链（见图7-3b）与定子磁链有一样的建立过程，其中外圆是电动机在空载稳态时的磁链轨迹，内圆是转速下降并反转后的磁链轨迹，可以看出，转速下降并反向后，转子磁链明显减小，因此电动机的转矩急剧下降（见图7-2c）。用XY图示仪在仿真中可以清楚地看到电动机磁场的运行过程，这是一般仪器难以看到的，仿真将电动机运行的各个瞬时状态呈现在大家眼前，体现了仿真的优点。

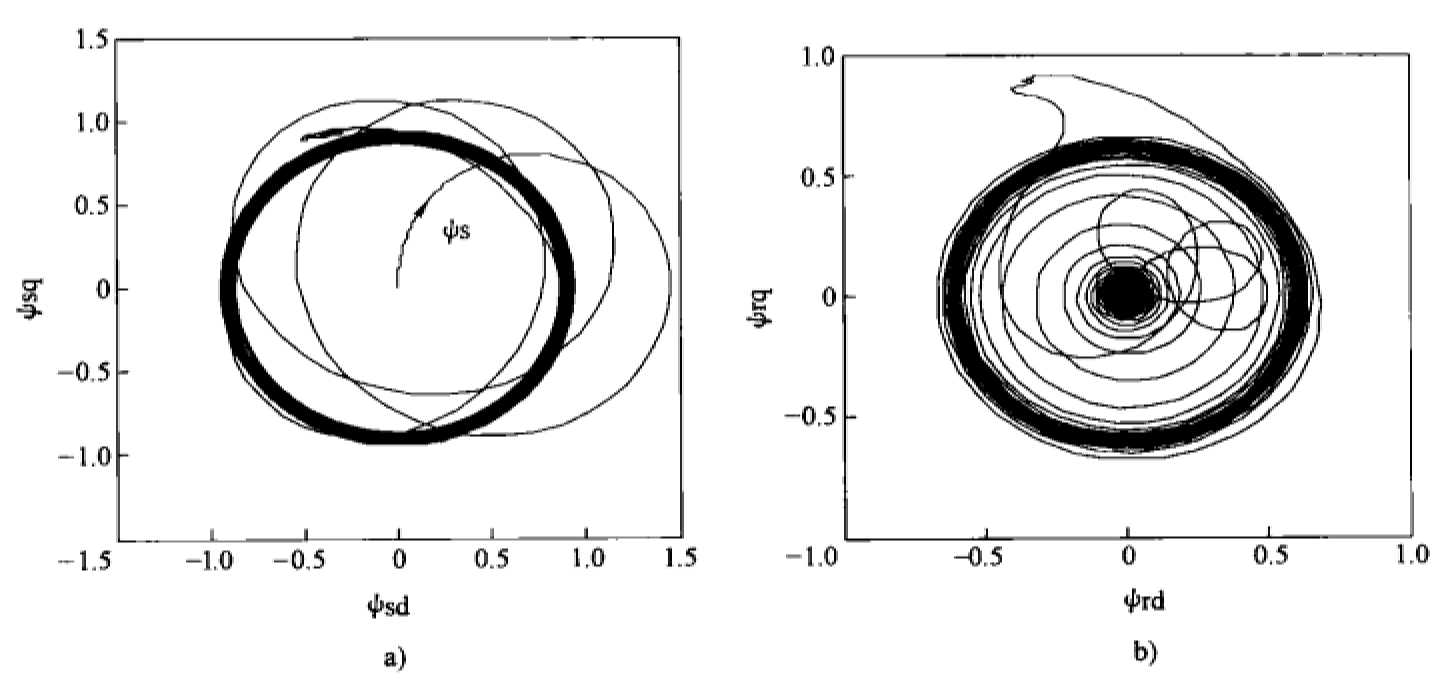


图7-3 异步电动机的磁场轨迹

a）定子磁链 b）转子磁链

7.1.2 PWM变频器-电动机系统仿真

交流异步电动机由逆变器供电的仿真模型如图7-4所示，模型由直流电源DC、逆变器Universal Bridge、调制器PWM Generator、异步交流电动机模块以及测量模块组成，异步交流电动机模块的设置与正弦电压供电时相同，逆变器Universal Bridge和调制器PWM Generator模块设置参考图5-57。电动机空载起动的工作波形如图7-5所示。电动机的磁链轨迹如图7-6所示，在PWM调制下，定子磁链不如正弦供电时光滑，在仿真的0.4s内，定子和转子磁链都还没有进入稳定状态，延长仿真时间可以看到定子磁链几近圆形，磁链的脉动将引起电动机的转矩脉动。

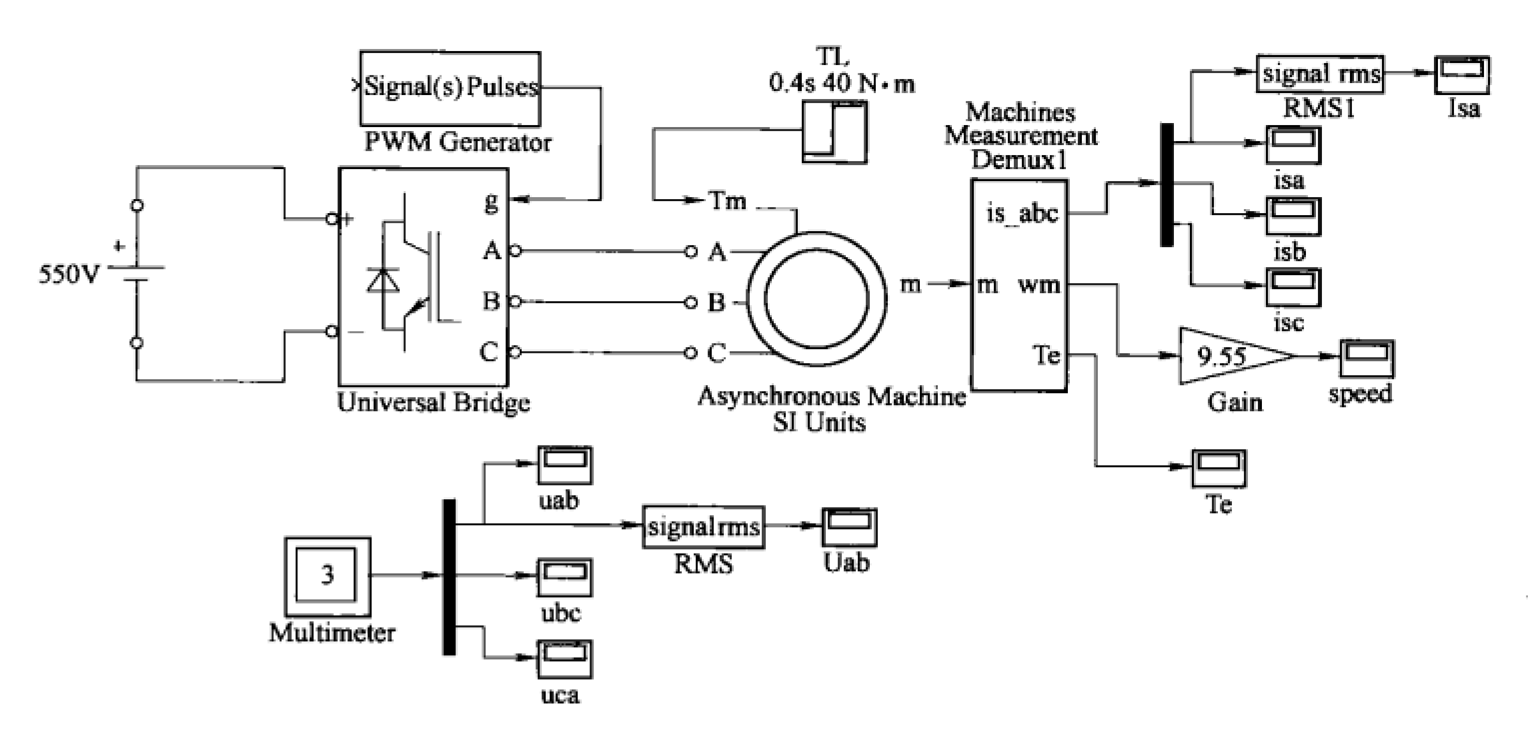


图 7-4　PWM 变频器-交流异步电动机系统模型

图 7-5　逆变器供电电动机工作波形

a）逆变器输出电压（u_{AB}）　b）电动机定子电流（i_A）　c）电动机转子电流（i_a）
d）转速　e）转矩　f）机械特性

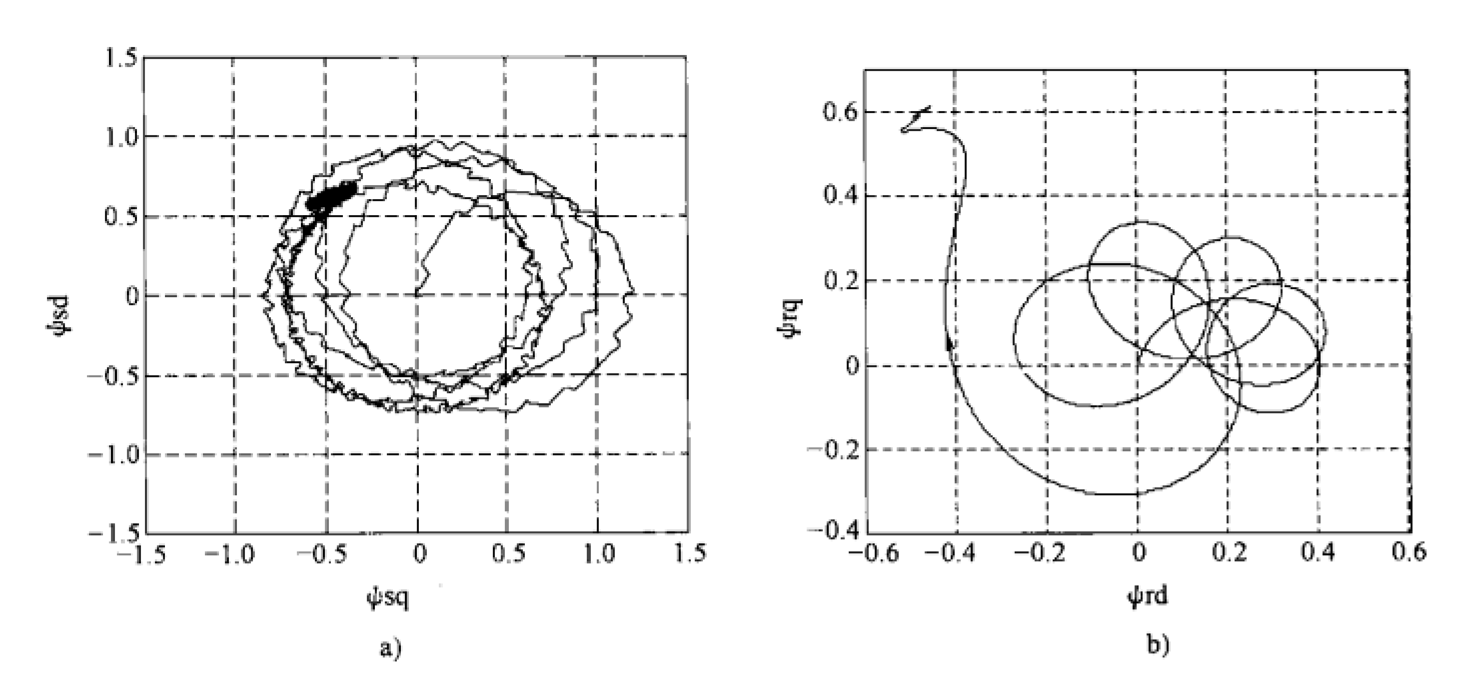


图 7-6 SPWM 逆变器供电时电动机磁链曲线
a）定子磁链 b）转子磁链

7.2 交流电动机减压软起动系统仿真

在有限供电系统中，较大容量的交流电动机起动时，由于起动电流过大，会引起电网电压下降，而影响其他用电设备的正常工作，所以一般较大容量的交流电动机起动都采用减压起动方式，以减小起动电流。传统的减压起动方法有星－三角形起动和自耦变压器起动等。现在应用晶闸管交流调压原理的软起动控制器已经大量面市，软起动控制器可以通过电压调节限制起动电流，并且使电动机有较大的起动转矩，在起动结束后，再经过接触器切除软起动器，让电动机直接连接三相电源完成起动过程。晶闸管软起动器的电气原理如图 7-7 所示。软起动电路由三相晶闸管调压电路和软起动控制器（给定积分器）、触发器等组成，起动时通过控制器使晶闸管控制角从大到小变化，而电动机电压从小到大逐渐上升。其仿真电路如图 7-8 所示。通过仿真可以研究软起动器的控制曲线、电流限制效果和电动机转矩的情况。

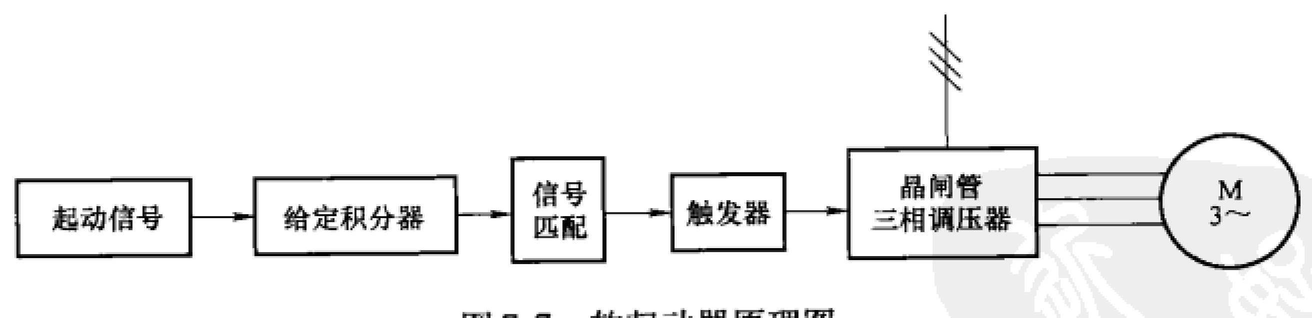


图 7-7 软起动器原理图

在模型中，双向晶闸管模块 VT 和触发器模块 pulse 请参见第 5 章 5.4 节，异步电动机模块（Asynchronous Machine SI Units）参数见表 7-2。三相电阻 $R_{a,b,c}$ 仅是为检测交流调压器输出的相电压而设置的，通过多路检测仪（multimeter）检测电阻两端电压来观察交流调压器输出电压波形。模型的控制部分由 step、GI 和 Fcn 三个模块组成，其中 step 给出阶跃起动信号，GI 模块用于设定起动曲线，函数 Fcn 用于使控制信号与触发器输入信号要求相匹配。给定积分 GI 分支模块的构成如图 7-9 所示。其中放大器（Gain）的作用是使积分时间

图 7-8　交流电动机软起动器的仿真模型

常数不受放大器输入偏差大小的影响，所以放大倍数可以取大一些，本例中取 $K=1000$。限幅器（Saturaction）用于设定积分时间常数，限幅值为 ±0.2，调节限幅器的上下限可以调节给定积分器输出曲线的上升斜率。晶闸管三相调压器给电动机供电时，晶闸管控制角的移相范围受一定限制，当控制角较大时，调压器输出电压过低，电动机起动转矩太小，电动机不能起动；当控制角小于电动机功率因数角时，调压器失去调压作用，调压器输出全电压；本例调压器触发模块移相控制电压 U_C 与控制角的关系如图 7-10 所示。综合以上因素在控制环节中设置了函数匹配环节（Fcn），匹配关系为

$$f[u(1)]=6.5-u(1)$$

式中，6.5 为能使电动机起动的最小控制电压；$u(1)$ 为给定积分器输出。

表 7-2　软起动仿真参数

三　相　电　源			
电压	220 * sqrt(2) V	频率	50Hz
电动机(容量 4.7kW)			
电压	380V	频率	50Hz
定子绕组电阻 Rs	0.435Ω	定子绕组漏感 Lls	0.004H
转子绕组电阻 Rs	0.816Ω	转子绕组漏感 Lls	0.004H
互感 Lm	0.0693H	转动惯量 J	0.189kg · m^2
摩擦系数 F	0	极对数 p	2
给定积分器 GI			
放大器 kp	1000	限幅器限幅值	±0.2
负载设定 T_L			
加载时间	0.5s	加载值	20
仿　真　参　数			
算法	Ode15s	相对误差	10^{-3}

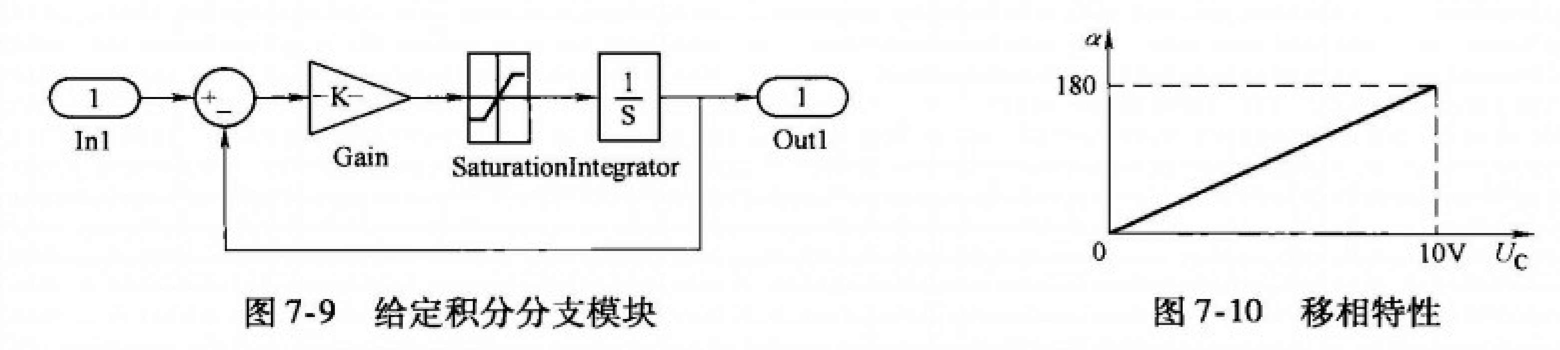


图 7-9　给定积分分支模块　　　　图 7-10　移相特性

用交流电动机软起动模型对电动机空载起动过程进行仿真，并与电动机全电压直接起动相比较的结果如图 7-11 所示。比较图 7-11b 和图 7-11e 可以看到，采用软起动方式，电动机的起动电流显著减小，全电压起动时起动电流峰值可以达到 200A，而软起动方式限制起动电流峰值在 30A 左右，全电压起动的起动时间短，软起动达到额定转速的时间要长，但是起动过程更平稳。

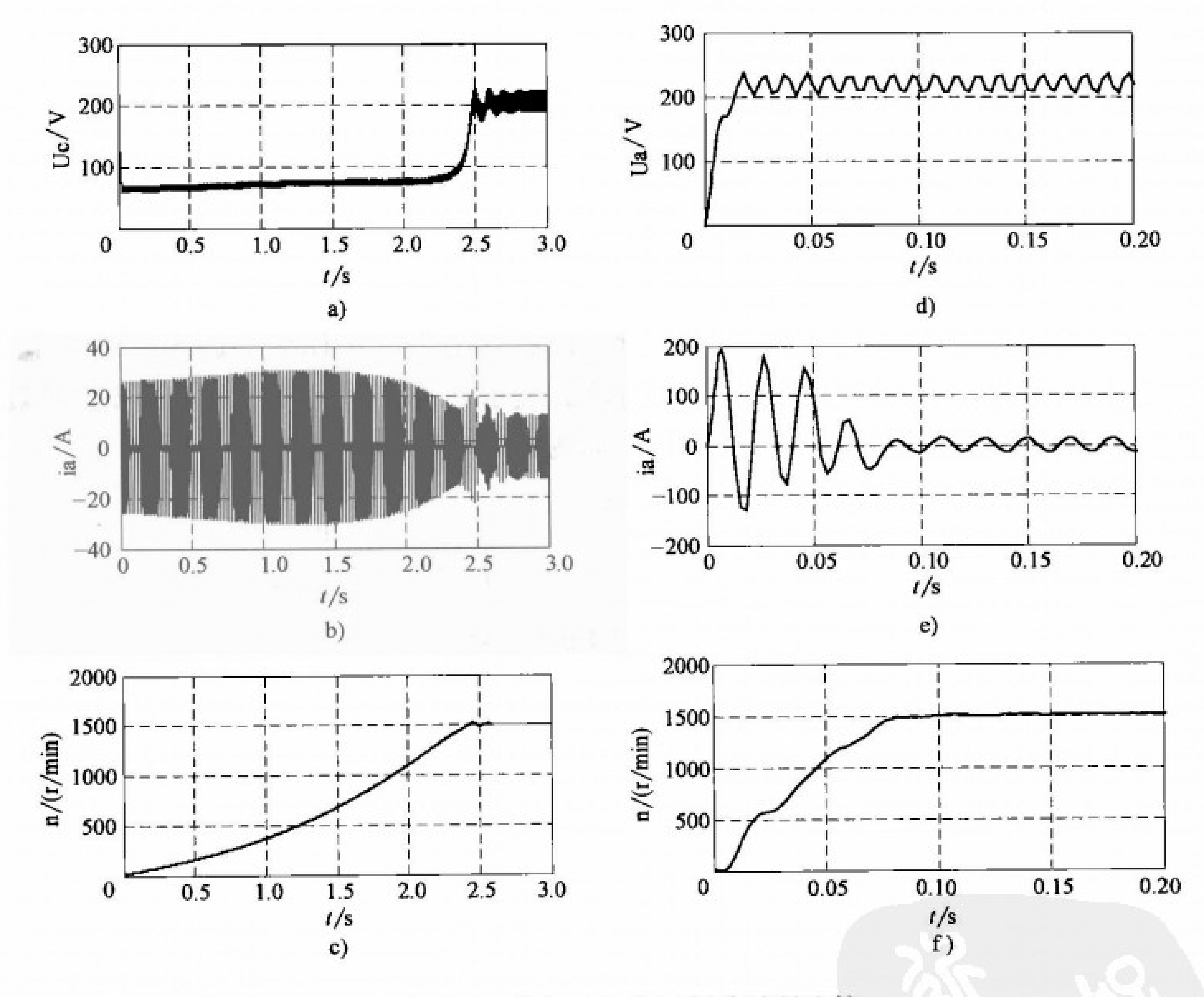


图 7-11　软起动和全压起动过程比较

a）软起动电动机输入电压（有效值）　b）软起动电动机电流（瞬时值）

c）软起动电动机转速变化过程　d）全电压起动电动机输入电压（有效值）

e）全电压起动电动机电流（瞬时值）　f）全电压起动电动机转速变化过程

7.3　转速开环恒压频比控制的交流异步电动机调速系统仿真

转速开环恒压频比控制是交流电动机变频调速最基本的控制方式，一般变频调速装置都

带有这项功能，恒压频比的转速开环工作方式能满足大多数场合交流电动机调速控制的要求，并且使用方便，是通用变频器的基本模式。采用恒压频比控制，在基频以下的调速过程中可以保持电动机气隙磁通基本恒定，在恒定负载情况下（恒转矩），电动机在变频调速过程中的转差率基本不变，所以电动机的机械特性较硬，电动机有较好的调速性能。但是如果频率较低，定子阻抗压降所占比重较大，电动机就难于保持气隙磁通不变，电动机的最大转矩将随频率的下降而减小。为了使电动机在低频低速时仍有较大的转矩，在低频时应适当提高定子电压（低频电压补偿），使电动机在低频时仍有较大的转矩。恒压频比变频调速系统的基本原理结构如图 7-12 所示，系统由升降速时间设定、U/f 曲线、SPWM 调制和驱动等环节组成。其中升降速时间设定用来限制电动机的升频速度，避免转速上升过快而造成电流和转矩的冲击，相当于软起动控制的作用。U/f 曲线用于根据频率确定相应的电压，以保持压频比不变（U/f = 常数），并在低频时进行适当的电压补偿。SPWM 和驱动环节将根据频率和电压要求产生按正弦脉宽调制的驱动信号，控制逆变器，以实现电动机的变压变频调速。

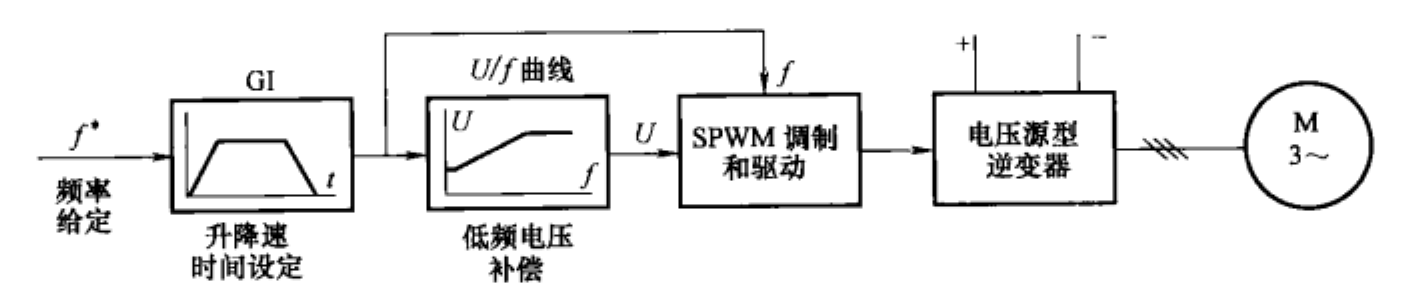


图 7-12　恒压频比变频调速系统原理图

转速开环变频调速系统的仿真模型如图 7-13 所示。图中逆变器、电动机、SPWM 生成等主要模块提取路径见表 7-3。

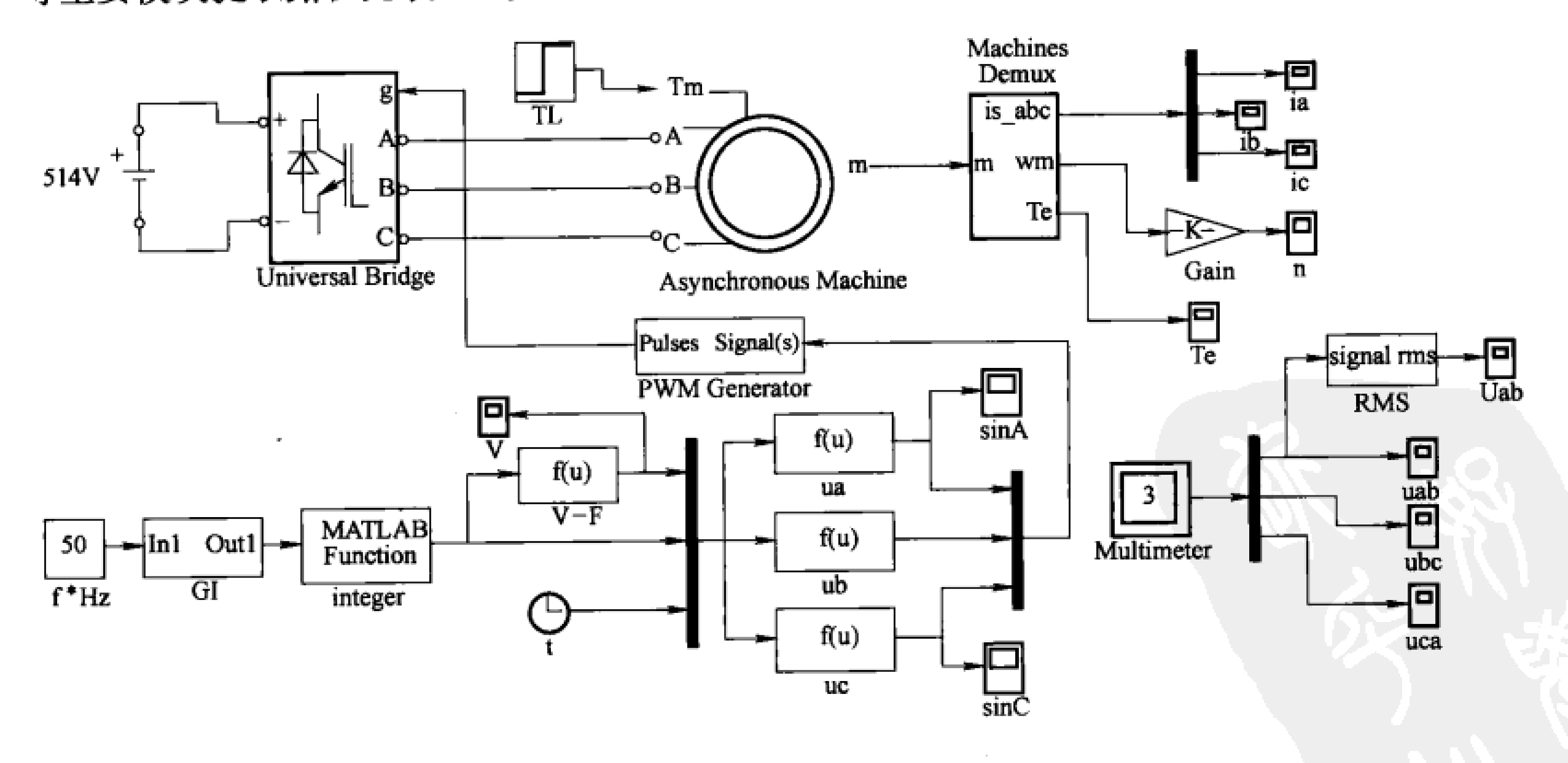


图 7-13　转速开环 VVVF 系统仿真模型

其中给定积分器的模型同图 7-9，设定恰当的积分时间常数可以控制频率上升的速率，从而设定电动机的起动时间。在给定积分器的后面插入了一个取整环节（integer），使频率为整数。U-f 曲线（见图 7-14）由函数发生器 Fcn 产生，根据频率确定相应的电压值，其函

表 7-3 转速开环变频调速系统模型模块提取路径

模块名称	标识名称	提取路径
交流异步电动机	AC motor	Power system blockset/Machine/Asynchronous
电动机测量单元	Machine measurement	Power system blockset/Machine/Measurement Demux
逆变器	Spwm bridge	Power system blockset/Power Electronice/Universal Bridge
频率给定	f Hz	Simulink/source/constant
取整数	integer	Simulink/functions/MATLAB Fcn
SPWM 生成	PWM Generator	Power system blockset/Extra Library/control blocks/PWM generator
U/f 曲线	Fcn	Simulink/functions/Fcn
三相调制正弦信号	U_a、U_b、U_c	Simulink/functions/Fcn
三相信号合成	Dux	Simulink/signals/Mux

数表达式为

$$U = \frac{U_N}{f_N} f + U_0$$

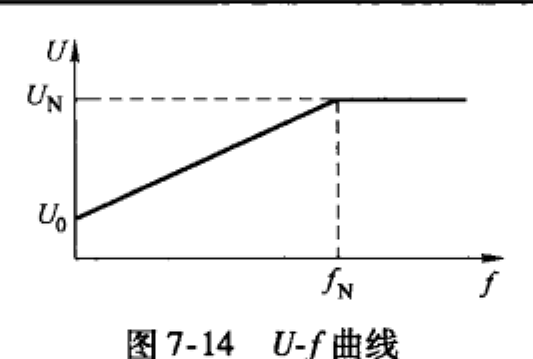


图 7-14 U-f 曲线

式中，U_N 为电动机额定电压，f_N 为电动机额定频率，U_0 为初始电压补偿值。电压 U、频率 f、时间 t 经 Dux 汇总为一维向量 $x = [u(1), u(2), u(3)]$，式中 $u(1)$、$u(2)$、$u(3)$ 依次表示电压、频率和时间。函数模块 u_a、u_b、u_c 分别用于产生三相调制信号：

$$u_a = u(1)*\sin[2*pi*u(2)*u(3)]$$

$$u_b = u(1)*\sin\left[2*pi*u(2)*u(3) - \frac{2*pi}{3}\right]$$

$$u_c = u(1)*\sin\left[2*pi*u(2)*u(3) - \frac{4*pi}{3}\right]$$

根据三相调制信号，由 PWM 发生器产生逆变器驱动脉冲，经逆变器得到频率和幅值可调的三相电压，使交流电动机按给定要求起动和运行。模型中的其他参数设定见表 7-4。

表 7-4 转速开环 VVVF 系统模型参数

模块	参数	设置值	模块	参数	设置值
给定积分器 GI	Gain(G)	1e4	逆变器直流侧电压	Ud	514V
	Saturation	±10			
取整 integer		round	PWM 发生器	载波频率 fs	1500Hz
仿真算法		Ode23tb	仿真精度		1e-3

在给定频率为 50Hz，起动时间为 5s 的情况下，仿真结果如图 7-15 所示。其中图 7-15a 是电动机输入的一相线电压（有效值），图 7-15b 为转速变化曲线，图 7-15c 为转速-转矩特性。从图中可以看到，电动机电压基本按 U-f 曲线的设定上升，但是起动中转速和转矩的波动很大。

为分析转速和转矩产生较大波动的原因，将起动过程中一段（3～4s）的电压、转速等波形展开，如图 7-16 所示。从逆变器输出电压的波形（见图 7-16b）中可以看到，输出电

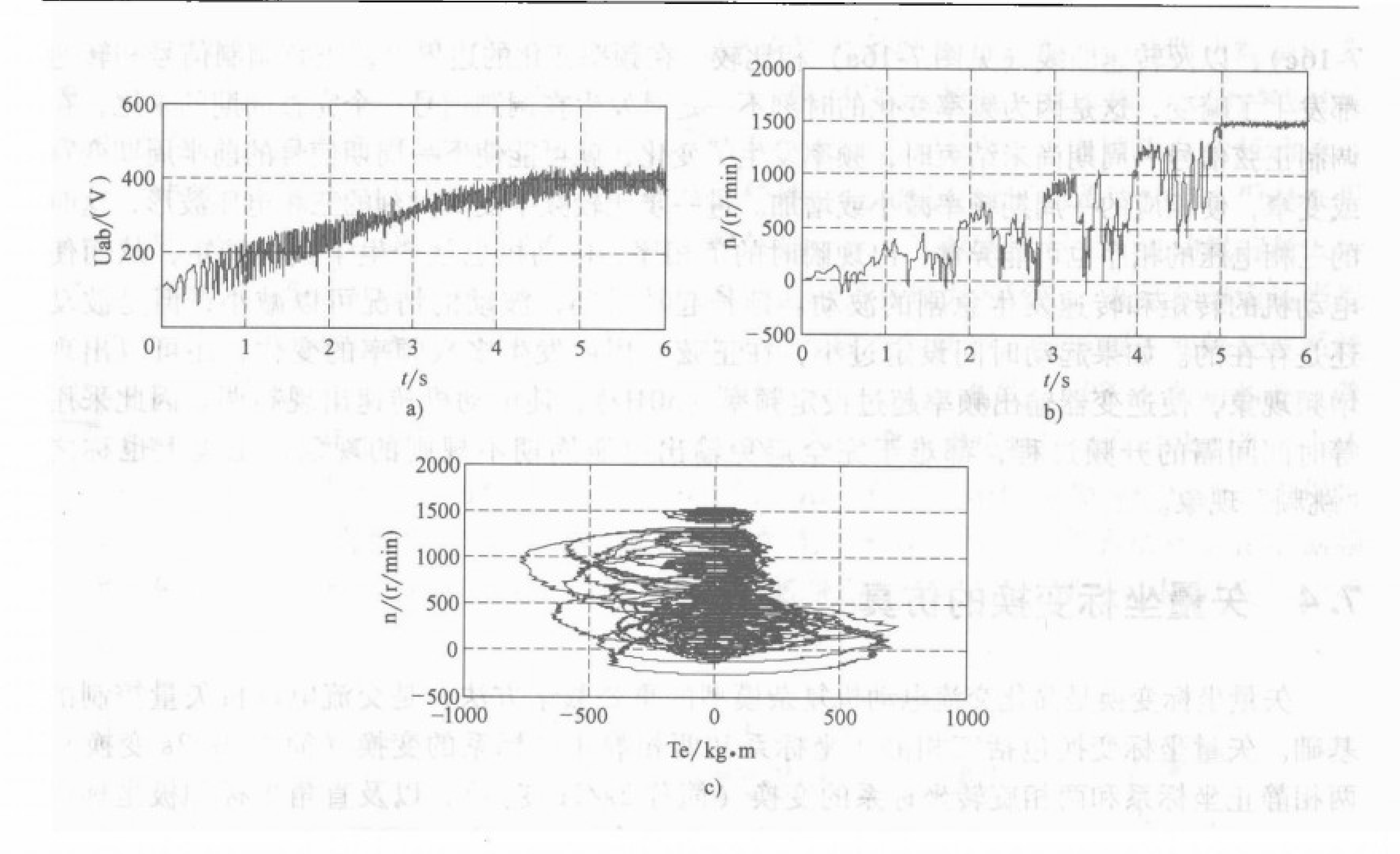


图 7-15　VVVF 起动过程

a）逆变器输出线电压　b）转速波形　c）转速-转矩特性

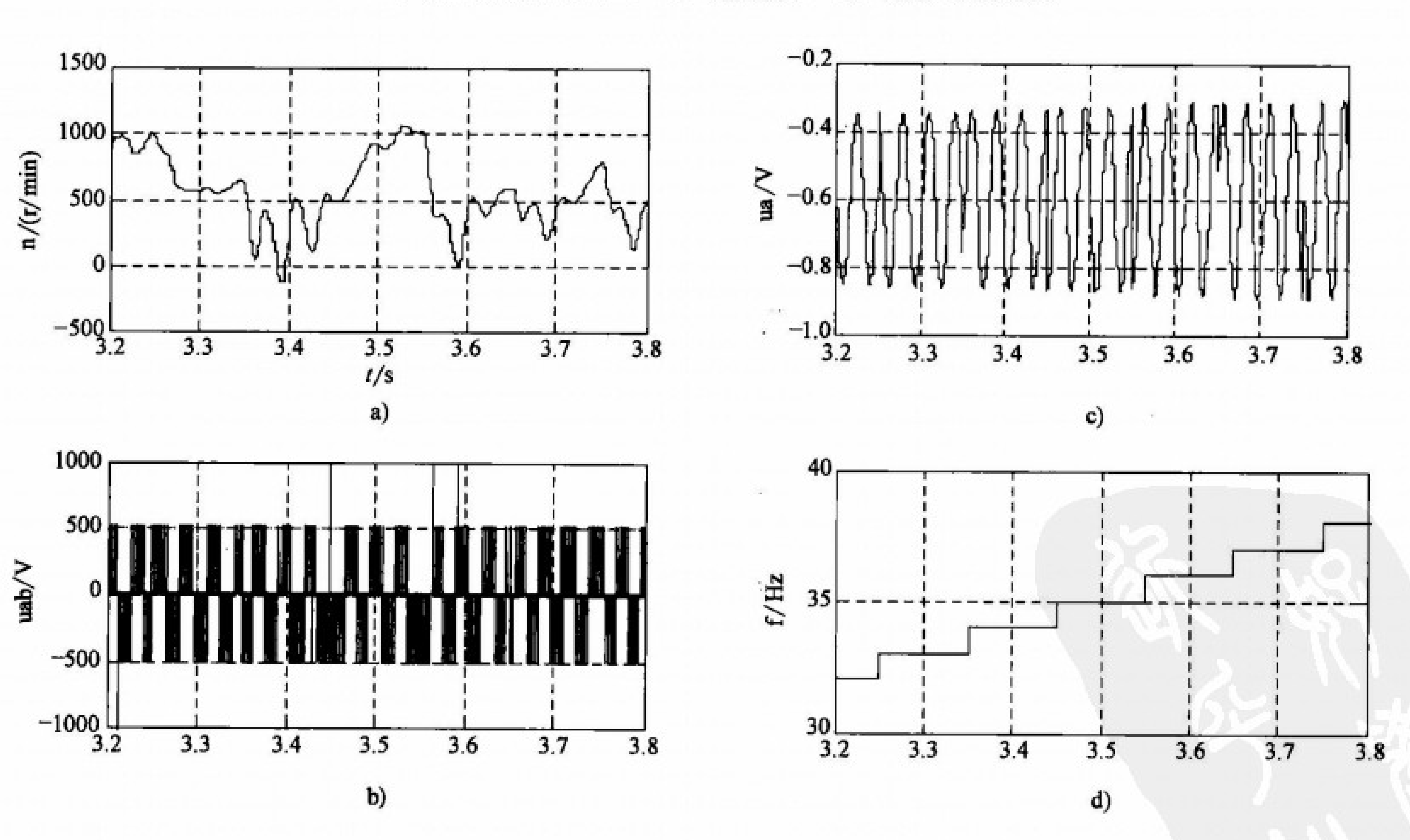


图 7-16　VVVF 系统起动分析

a）转速波形　b）逆变器输出电压（瞬时值）　c）正弦调制信号　d）频率上升曲线

压的频率变化呈现出不规则，电压频率不是均匀地上升，中间部分时段电压波形的周期变大、频率减小。将起动过程中的升频曲线（见图 7-16d）和相应时段的正弦调制信号（见图

7-16c)，以及转速曲线（见图 7-16a）相比较，在频率变化的边界上，正弦调制信号和转速都发生了畸变，这是因为频率变化的时刻不一定是发生在调制信号一个完整周期的末尾，在调制正弦信号一周期尚未结束时，频率发生了变化，就可能使下一周期信号的前半周期变宽或变窄，使相应的一周期频率减小或增加。进一步比较频率变化时刻的三相电压波形，这时的三相电压的相序也可能异常，出现瞬时的负相序，电动机也就产生了负的转矩，从而使电动机的转矩和转速发生急剧的波动。延长起动时间，波动的情况可以减小，但是波动还是存在的。如果起动时间设定过小，在正弦一周内发生多次频率的变化，还可以出现增频现象，使逆变器输出频率超过设定频率（50Hz），使电动机转速出现超调。因此采用等时间间隔的升频过程，都难于完全避免输出电压周期不规则的现象，工程上也称之“跳频”现象。

7.4　矢量坐标变换的仿真

矢量坐标变换是简化交流电动机复杂模型的重要数学方法，是交流电动机矢量控制的基础。矢量坐标变换包括三相静止坐标系和两相静止坐标系的变换（简称 3s/2s 变换）、两相静止坐标系和两相旋转坐标系的变换（简称 2s/2r 变换），以及直角坐标和极坐标的变换（K/P 变换）等。矢量坐标变换是一组矩阵表达式，读者往往不易建立数学变换的物理概念，而矢量坐标变换的仿真可以帮助实现这一点，从而加深对矢量变换物理意义的认识。

7.4.1　三相静止坐标系和两相静止坐标系的变换

交流电动机三相对称绕组通以三相对称电流可以在电动机气隙中产生空间旋转的磁场，在功率不变的条件下，按磁动势相等的原则，三相对称绕组产生的空间旋转磁场可以用两相对称绕组来等效（见图 7-17），三相静止坐标系和两相静止坐标系的变换则建立了磁动势不变情况下三相绕组和两相绕组电压、电流和磁动势之间的关系。设 i_α、i_β 为两相对称绕组的电流，i_A、i_B、i_C 为三相对称绕组的电流，它们间的变换关系为

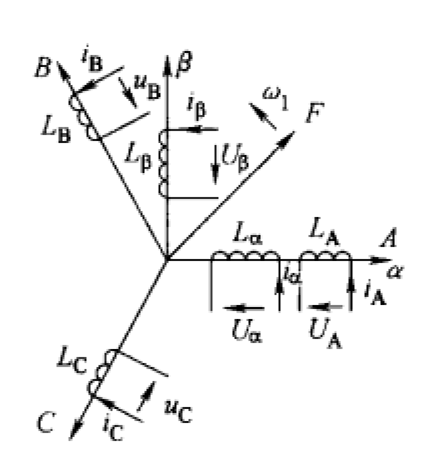


图 7-17　3s/2s 变换

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{3/2} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \tag{7-1}$$

式中，i_0 为便于逆变换而增加的一相零序分量；$\boldsymbol{C}_{3/2}$ 为 3s/2s 变换矩阵。

上述变换同样适用于电压和磁势的变换，且它们的逆变换也存在。

7.4.2　两相静止坐标系和两相旋转坐标系的变换

两相静止坐标系和两相旋转坐标系的变换是用于建立两相静止绕组和两相旋转绕组间电

压或电流之间的关系。如图 7-18 所示，L_α L_β 是静止 α-β 坐标系的两个绕组，简称静止绕组，L_d、L_q 是 d-q 旋转坐标系上的两个绕组，简称旋转绕组。d-q 旋转坐标系的旋转速度是任意的，这是旋转变换的一般情况。如果静止绕组产生的旋转磁动势角速度是 ω_1，则

$$\omega_1 = \frac{2\pi f}{p}$$

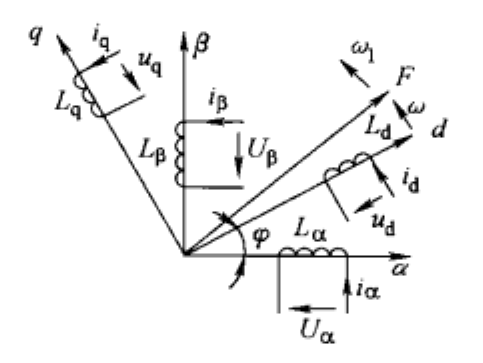


图 7-18　2s/2r 变换

式中，f 为静止绕组电流频率；p 为电动机极对数。

d-q 旋转坐标系的旋转速度是 ω，则旋转坐标系上旋转绕组中的电流角频率应为 $(\omega_1 - \omega)$。如果旋转坐标系的旋转速度 $\omega = \omega_1$，则旋转绕组中的电流角频率为零，即旋转绕组中的电流为直流，这也就是说，经过如此的坐标变换，交流电动机可以和直流电动机之间建立等效关系，使交流电动机可以用直流电动机的控制模式进行控制，这是交流电动机矢量控制的重要思路。

两相静止坐标系和两相旋转坐标系的变换关系为

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{2r/2s} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \tag{7-2}$$

式中，φ 为 d-q 坐标系 d 轴与 α-β 坐标系 α 轴之间的夹角，$\varphi = \int \omega \, dt$。

两相旋转到两相静止的变换矩阵：

$$\boldsymbol{C}_{2r/2s} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}$$

通过逆变换，也可以得到两相静止到两相旋转的变换矩阵：

$$\boldsymbol{C}_{2s/2r} = \boldsymbol{C}_{2r/2s}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi \\ -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}$$

如果旋转坐标系以同步角速度旋转时，即 $\omega = \omega_1$，则 d-q 坐标系也可改为由 M-T 坐标系来表示，这时仅需要将变量的下标由 d、q 改为 m、t 即可。

7.4.3　三相静止坐标系和两相旋转坐标系的变换

在得到三相静止坐标系到两相静止坐标系的变换和两相静止坐标系到两相旋转坐标系的变换矩阵后，也可以得到三相静止坐标系到两相任意旋转坐标系的变换

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{2s/2r} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{2s/2r}\boldsymbol{C}_{3s/2s} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_{3s/2r} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

式中，三相静止坐标系到两相任意旋转坐标系的变换矩阵为

$$\boldsymbol{C}_{3s/2r} = \boldsymbol{C}_{2s/2r}\boldsymbol{C}_{3s/2s} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\varphi & \cos(\varphi - 120^\circ) & \cos(\varphi + 120^\circ) \\ -\sin\varphi & -\sin(\varphi - 120^\circ) & -\sin(\varphi + 120^\circ) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

相应的，两相任意旋转坐标系到三相静止坐标系的变换矩阵为

$$C_{2r/3s}=C_{3s/2r}^{-1}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos\varphi & -\sin\varphi & \frac{1}{\sqrt{2}}\\ \cos(\varphi-120^\circ) & -\sin(\varphi-120^\circ) & \frac{1}{\sqrt{2}}\\ \cos(\varphi+120^\circ) & -\sin(\varphi+120^\circ) & \frac{1}{\sqrt{2}}\end{bmatrix}$$

这里需要指出的是，静止坐标系的静止是相对的概念，静止是指坐标系对与人的位置是不动的，如果三相坐标系本身在旋转，这相当异步电动机转子的工作情况，转子相对于人静止位置的旋转角速度为 ω_r，转子三相绕组产生的旋转磁场旋转角速度 ω_2 与定子三相绕组产生的旋转磁场旋转角速度 ω_1 的相对转速为（$\omega_1-\omega_2$），即异步电动机的转差 $\omega_s=\omega_1-\omega_2$，因此上述三相静止/二相旋转的变换应用于转子时，影响的仅仅是其中二相静止/二相旋转变换的转角 φ，因为 φ 是旋转坐标系与静止坐标系的位置角，$\varphi=\int\omega\mathrm{d}t$，考虑到现在静止坐标系也在旋转，因此转角 φ 需要修正。

7.4.4 矢量坐标变换的仿真

三相静止坐标系到两相任意旋转坐标系的变换及其反变换已经建立在 power system 模型库中，提取路径为 power system blockset/extra library/measurements/abc-to-dq0 transformation (dq0-abc transformation)。矢量变换的仿真以下例说明。

【例 7-1】 观察三相电压经 3s/2s 和 3s/2r 变换后的结果，三相电压为 220V、50Hz。

建立的观察三相电压 3s/2s 和 3s/2r 变换的仿真模型如图 7-19 所示。图中调用了两个 abc-to-dq0transformation 模块，调用的 abc-to-dq0 模块有两个输入端和一个输出端。输入端 abc 连接需变换的三相信号，输入端 sin-cos 为 d-q 坐标系 d 轴与静止坐标系 A 轴之间夹角 φ 的正、余弦信号，输出端 dq0 输出变换后的 d 轴和 q 轴分量以及 0 轴分量。在模型中三相电压信号由可编程信号源（3-phase programmable source）产生，夹角 φ 由时钟（Clock）、常数（constant）模块产生，$\varphi=\omega=2\pi ft$，并经 sin、cos 模块产生正、余弦信号。

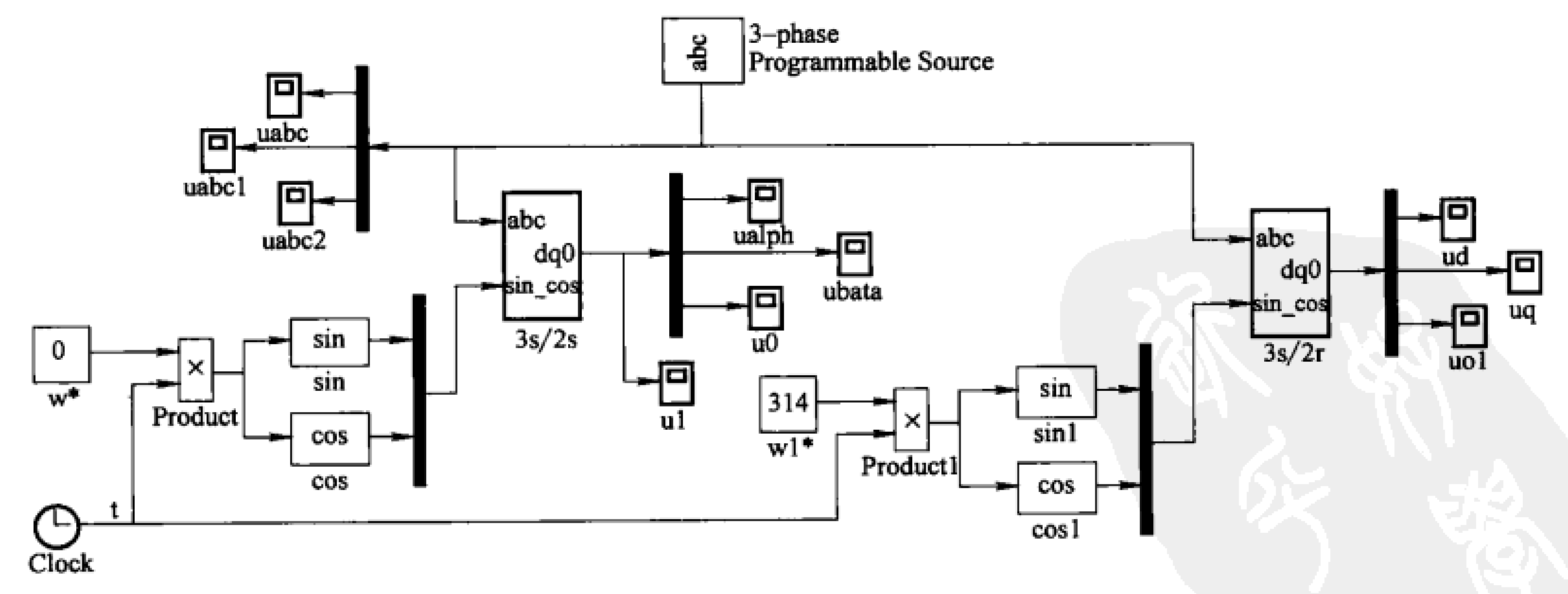


图 7-19 三相电压的 3s/2s 和 3s/2r 变换模型

图中的两个 abc-to-dq0 模块，一个用于 3s/2s 变换，另一个用于 3s/2r 变换。用于 3s/2s 变换时，设置常数模块值为零，即 $\varphi=\omega t=0$，这意味着 d-q 坐标系的 d 轴与静止坐标系 A

轴重合，d-q 坐标系不旋转，这时 d-q 坐标系已蜕化为静止的 α-β 坐标系，abc-to-dq0 模块现在实现的是 3s/2s 变换。用于 3s/2r 变换时，设置常数模块值为 314，即 $\omega t=2\pi f=2\pi\times 50$，仿真结果如图 7-20 所示。其中图 7-20a 为变换前的三相电压，图 7-20b 为经 3s/2s 变换后静止二相坐标系上的电压波形，这二相电压互差 90°。图 7-20c 为经 3s/2r 变换后旋转二相坐标系上的电压波形，由于所选角频率 $\omega=2\pi f$，与电源角频率同步，所以在二相同步旋转坐标系上的电压已经是直流。

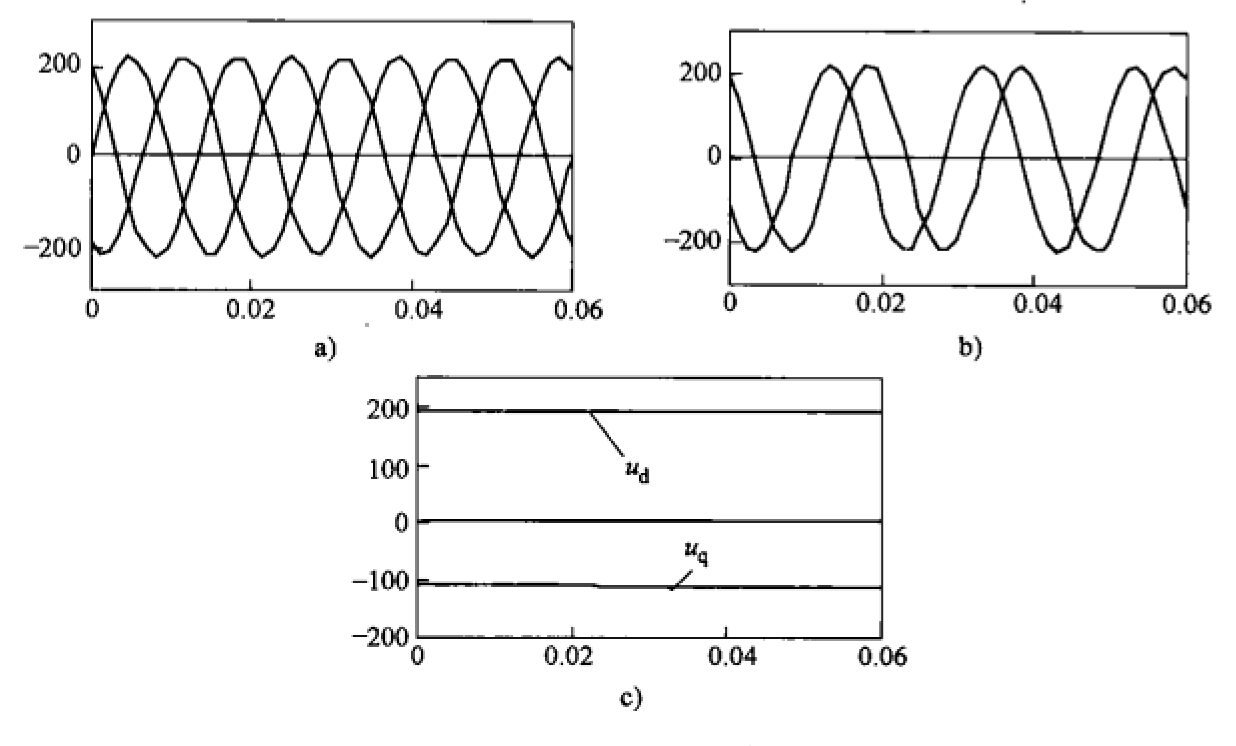


图 7-20　电压变换波形

a）变换前的三相电压波形　b）经 3s/2s 变换后的电压波形　c）经 3s/2r 变换后的电压波形

7.5　交流异步电动机的磁链观察

交流异步电动机的磁场控制是调速控制中的关键问题，在基频以下调速时，无论按稳态模型还是动态模型控制，都需要保持电动机气隙磁通恒定，在基频以上调速时，需要弱磁控制。异步电动机的励磁回路是非独立的，定子绕组输入的电流包含转矩分量和励磁分量两部分，这给异步电动机的控制带来很大的困难。如果按转子磁场的定向控制，则需要知道转子磁场的大小和位置，因此对电动机磁场进行实时控制，首先需要检测磁场。电动机磁场的直接检测，由于受到工程和技术条件的限制难于实现，一般采用计算的方法，即采用磁链模型进行观测。本节通过对磁链模型的仿真，观察磁链计算的效果。

7.5.1　转子磁链计算的电流模型

1. 在二相静止坐标系上的转子磁链电流模型

异步电动机在两相静止坐标系上的电压方程式为

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} R_s+L_sp & 0 & L_mp & 0 \\ 0 & R_s+L_sp & 0 & L_mp \\ L_mp & \omega L_m & R_r+L_rp & \omega L_r \\ -\omega L_m & L_mp & -\omega L_r & R_r+L_rp \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \tag{7-3}$$

式中，$u_{s\alpha}$、$u_{s\beta}$为两相静止坐标系上两相定子绕组电压；$u_{r\alpha}$、$u_{r\beta}$为两相静止坐标系上两相转子绕组电压；$i_{s\alpha}$、$i_{s\beta}$为两相静止坐标系上两相定子绕组电流；$i_{r\alpha}$、$i_{r\beta}$为两相静止坐标系上两相转子绕组电流；ω 为转子角速度；R_s、R_r 为定、转子一相绕组电阻；L_s、L_r 为两相坐标系上定、转子绕组的自感；L_m 为两相坐标系上同轴定、转子绕组间的互感。

由式（7-3）的第 1、2 行，可得定子回路的电压方程为

$$u_{s\alpha}=R_s i_{s\alpha}+L_s\frac{di_{s\alpha}}{dt}+L_m\frac{di_{r\alpha}}{dt} \tag{7-4}$$

$$u_{s\beta}=R_s i_{s\beta}+L_s\frac{di_{s\beta}}{dt}+L_m\frac{di_{r\beta}}{dt} \tag{7-5}$$

在两相静止坐标系上，转子磁链在 α、β 轴上的分量为

$$\psi_{r\alpha}=L_m i_{s\alpha}+L_r i_{r\alpha} \tag{7-6}$$

$$\psi_{r\beta}=L_m i_{s\beta}+L_r i_{r\beta} \tag{7-7}$$

因此

$$i_{r\alpha}=\frac{1}{L_r}(\psi_{r\alpha}-L_m i_{s\alpha}) \tag{7-8}$$

$$i_{r\beta}=\frac{1}{L_r}(\psi_{r\beta}-L_m i_{s\beta}) \tag{7-9}$$

在两相静止坐标系电压方程（式 7-3）的 3、4 行中，令 $u_{r\alpha}=u_{r\beta}=0$，且将式（7-8）和式（7-9）的关系代入，经整理后可得异步电动机转子磁链电流模型方程为

$$\psi_{r\alpha}=\frac{1}{T_r p+1}(L_m i_{s\alpha}-\omega T_r\psi_{r\beta}) \tag{7-10}$$

$$\psi_{r\beta}=\frac{1}{T_r p+1}(L_m i_{s\beta}+\omega T_r\psi_{r\alpha}) \tag{7-11}$$

式中，T_r 为转子电磁时间常数，$T_r=L_m/R_r$。

2. 按转子磁链定向二相旋转坐标系上的转子磁链电流模型

按转子磁链定向二相旋转坐标系上的转子磁链电流模型是通过检测定子三相电流和转速 ω_r 计算转子磁链，三相定子电流经 3s/2r 变换得到定子电流的励磁分量 i_{sm} 和转矩分量 i_{st}。并由异步电动机的矢量控制方程式：

$$T_e=n_P\frac{L_m}{L_r}i_{st}\psi_r \tag{7-12}$$

$$\omega_s=\frac{L_m i_{st}}{T_r\psi_r} \tag{7-13}$$

$$\psi_r=\frac{L_m}{T_r p+1}i_{sm} \tag{7-14}$$

通过矢量控制方程（7-13），可以计算电动机转差 ω_s 和定子频率 ω_1（$\omega_1=\omega_r+\omega_s$）。通过矢量控制方程（7-14），可以计算电动机转子磁链 ψ_r，计算流程如图 7-21 所示。

7.5.2 转子磁链的电压模型

根据异步电动机在二相静止坐标系上的数学模型的定子电压方程［式（7-3）］和转子电流方程［式（7-8）］和［式（7-9）］，可得转子磁链的电压方程［式（7-15）］，并构建

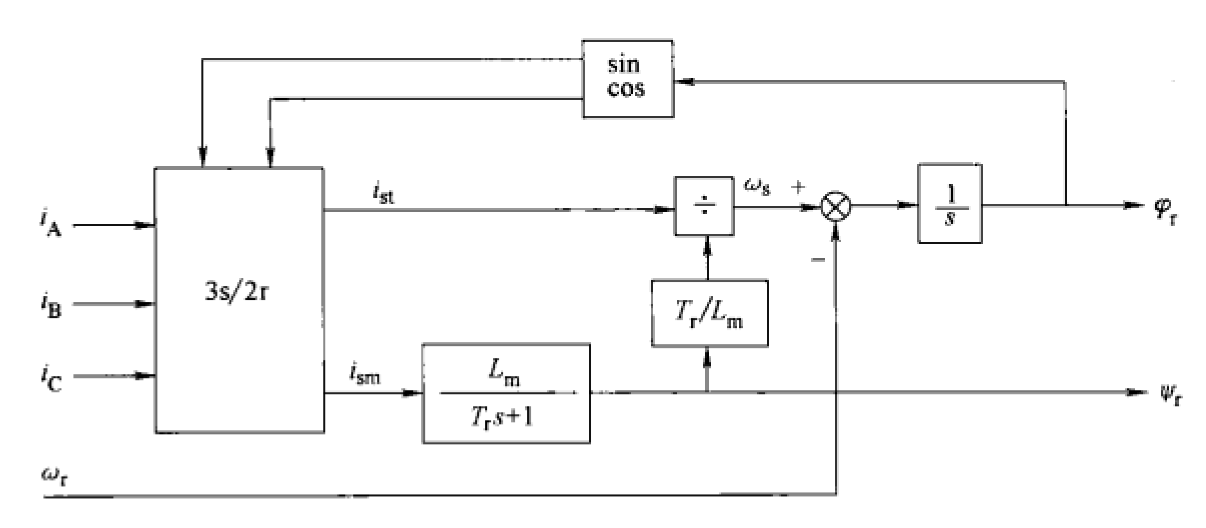


图 7-21　按转子磁链定向二相旋转坐标系上的转子磁链电流模型

转子磁链的电压模型如图 7-22 所示。

$$\Psi_{r\alpha}=\frac{L_r}{L_m}\left[\int(u_{s\alpha}-R_si_{s\alpha})\mathrm{d}t-\sigma L_si_{s\alpha}\right] \tag{7-15}$$

$$\Psi_{r\beta}=\frac{L_r}{L_m}\left[\int(u_{s\beta}-R_si_{s\beta})\mathrm{d}t-\sigma L_si_{s\beta}\right] \tag{7-16}$$

式中，漏磁系数 $\sigma=1-\frac{L_m^2}{L_sL_r}$。

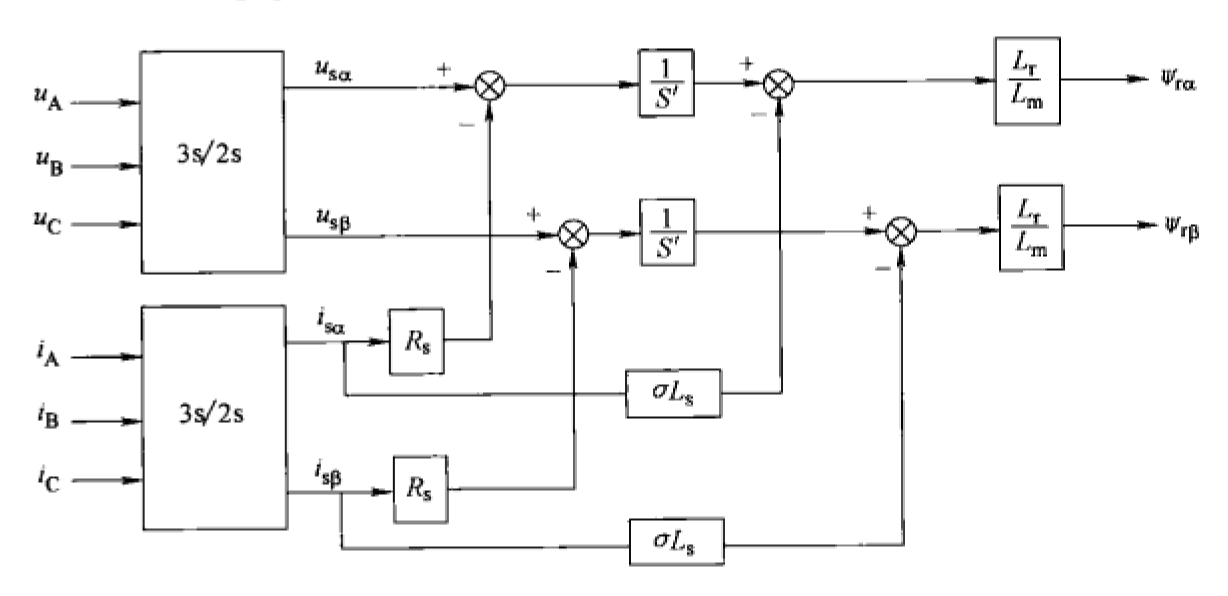


图 7-22　转子磁链的电压模型

7.5.3 转子磁链模型的仿真

转子磁链的仿真模型如图 7-23 所示，模型中，异步电动机（AC motor）由逆变器（interter）驱动，转子磁链的电流模型从电动机测量模 M 块得到定子三相电流（iabc）和转速（wr）信号，模型的输出是转子磁链 Ψ_r（psir）。

转子磁链的电压模型从电动机测量模 M 块得到定子三相电流（iabc），从电动机定子侧经电压测量单元取得三相电压信号（uabc），电压模型的输出是转子磁链在 αβ 轴上的分量 $\Psi_{r\alpha}$、$\Psi_{r\beta}$（psir-α、psir-β）。

电流模型使用在二相同步旋转坐标系上按转子磁链定向的磁链模型（见图 7-21），模型的结构如图 7-24 所示。电压模型的结构如图 7-25 所示，其中磁链在 αβ 坐标系上，电压模型的分支模块结构如图 7-26 所示。

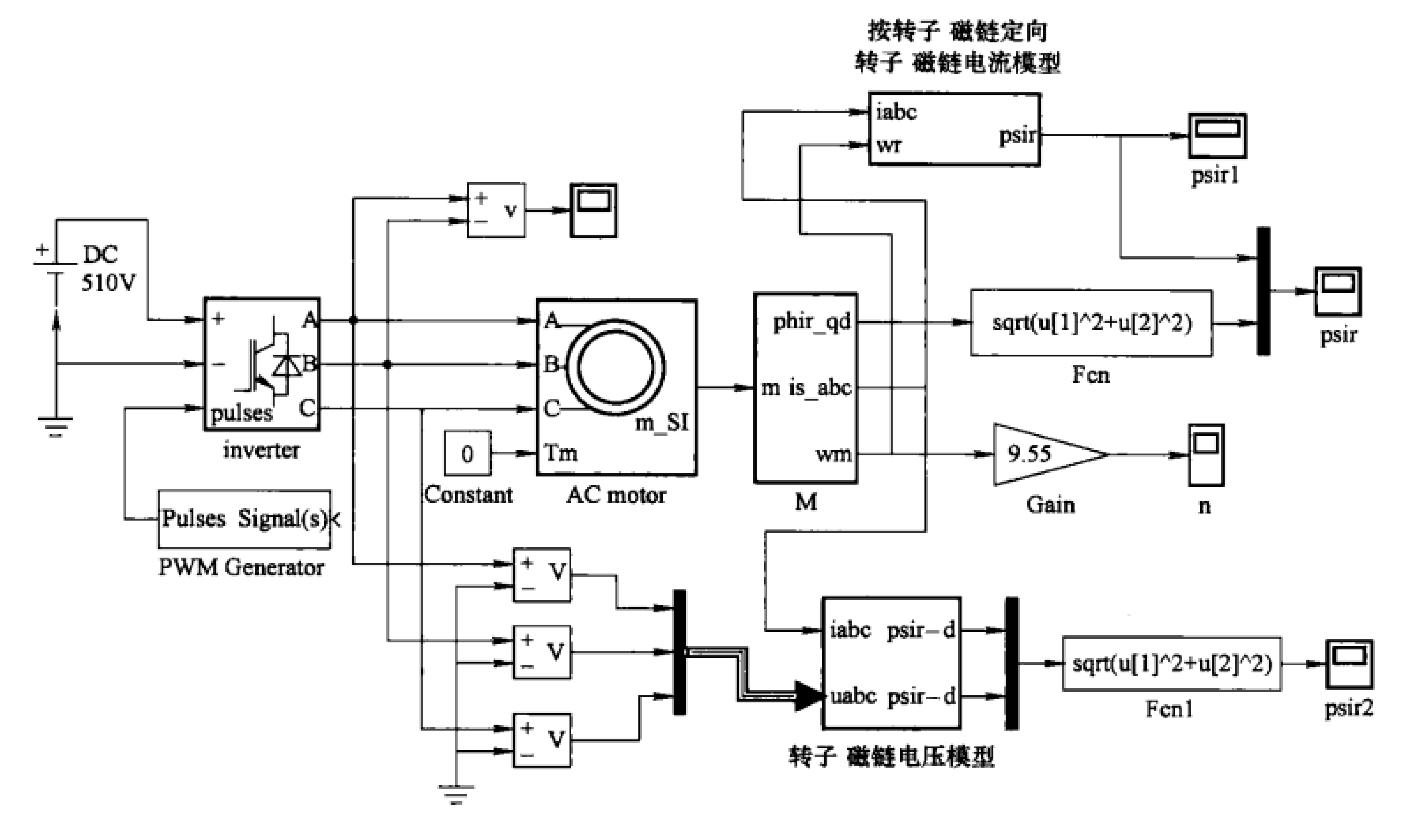


图 7-23　转子磁链的仿真模型

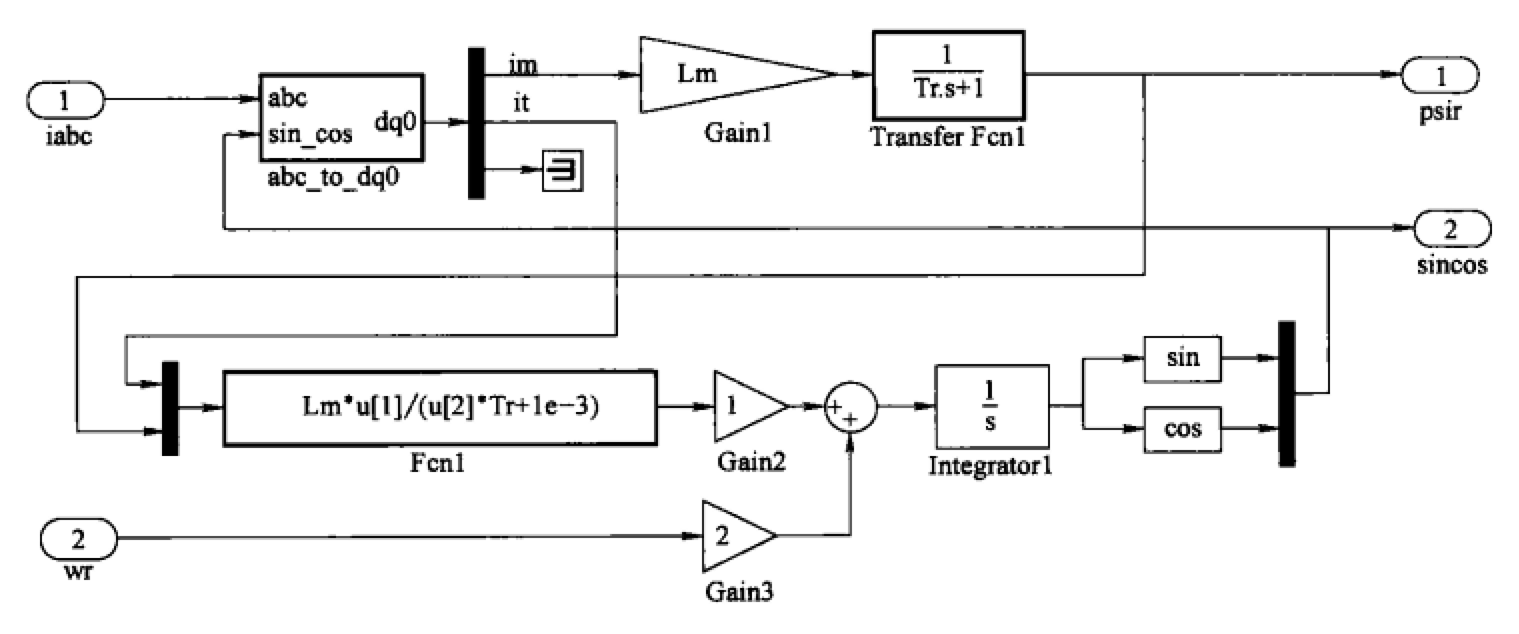


图 7-24　转子磁链电流模型结构（二相同步旋转坐标系）

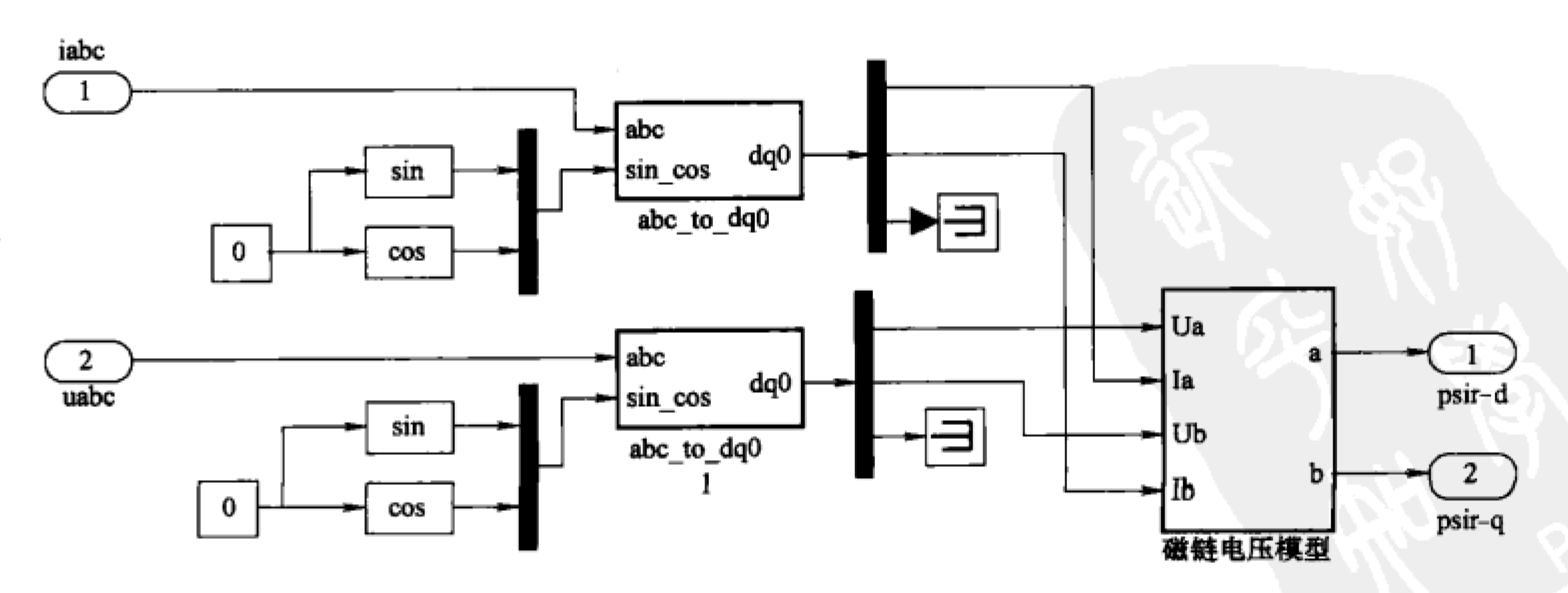


图 7-25　转子磁链电压模型计算流程

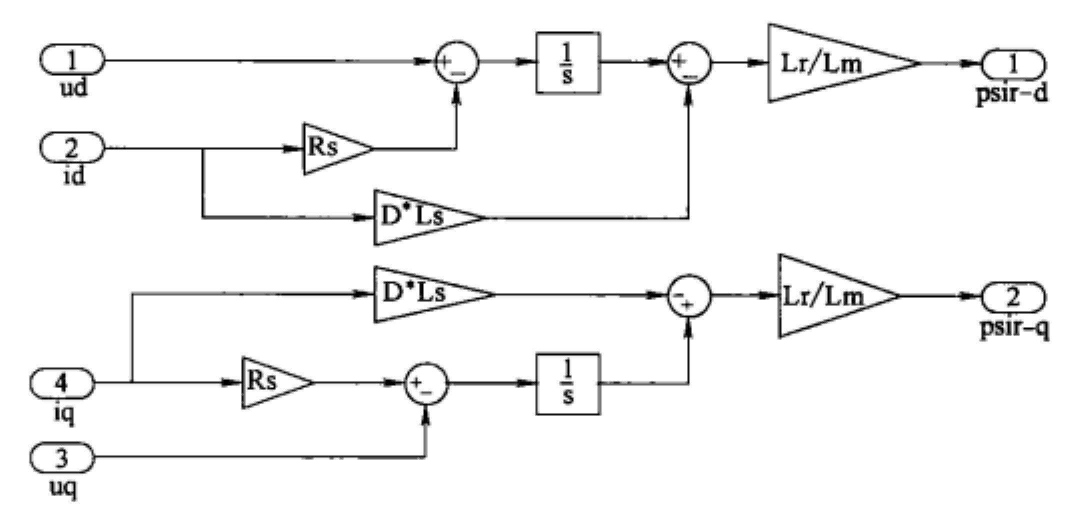


图 7-26　转子磁链电压模型结构

【例 7-2】　转子磁链模型的计算参数设置如下：电动机：380V、50Hz、2 对极，$R_s = 0.435\Omega$，$L_{ls} = 0.002\text{mH}$，$R_r = 0.816\Omega$，$L_{lr} = 0.002\text{mH}$，$L_m = 0.069\text{mH}$，$J = 0.19\text{kg} \cdot \text{m}^2$。逆变器直流电源 510V。定子绕组自感 $L_s = L_m + L_{ls} = (0.069 + 0.002)\text{mH} = 0.071\text{mH}$；转子绕组自感 $L_r = L_m + L_{lr} = (0.069 + 0.002)\text{mH} = 0.071\text{mH}$；漏磁系数 $\sigma = 1 - L_m^2/L_sL_r = 0.056$；转子时间常数 $T_r = L_r/R_r = 0.071/0.816 = 0.087$。

将上述参数代入模型，可得仿真结果，如图 7-27 所示。其中图 7-27a 和图 7-27b 是 PWM 发生器输出频率取 50Hz，调制度取 0.9 时的转子磁链波形；图 7-27c 和图 7-27d 是 PWM 发生器输出频率取 10Hz，调制度取 0.2 时的转子磁链波形。波形表明，转子磁链的电流模型和电源模型计算得到结果是一致的，并且磁链模型的计算结果与电动机测量单元输出的转子磁链波形比较相差甚微（见图 7-27a）。实际上转子磁链的电压模型因为受定子电阻的影响较大［见式（7-15）、式（7-16）］，比较起来电压模型更适合于中、高速范围内转子磁链的观测，低速时采用电流模型更适合。

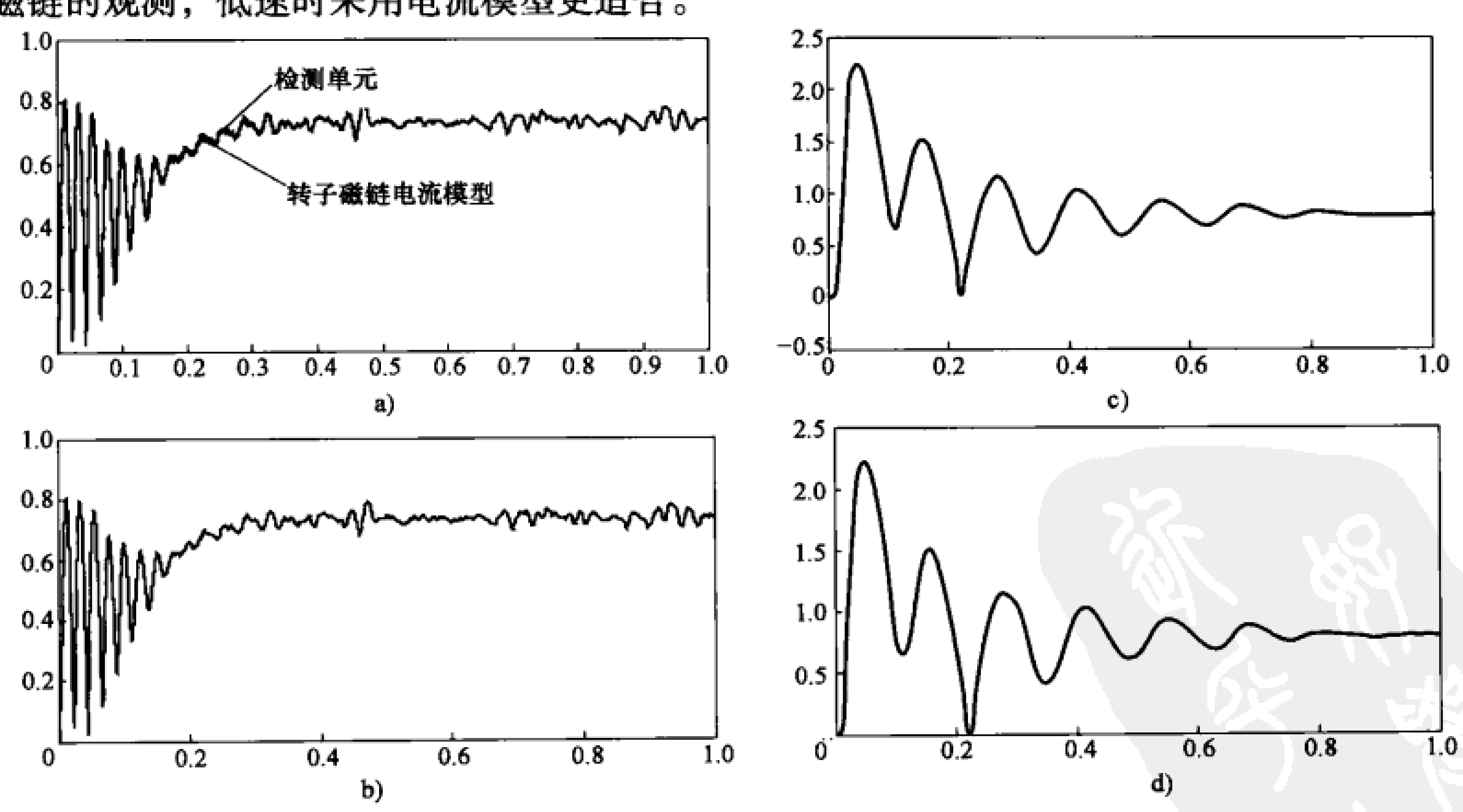


图 7-27　转子磁链观测结果

a）电流模型：输出频率 50Hz，调制度 0.9　b）电压模型：输出频率 50Hz，调制度 0.9

c）电流模型：输出频率 10Hz，调制度 0.2　d）电压模型：输出频率 10Hz，调制度 0.2

7.6 交流异步电动机矢量控制调速系统的仿真

矢量控制是目前交流电动机的先进控制方式，一般将含有矢量变换的交流电动机控制都称为矢量控制，实际上只有建立在等效直流电动机模型上，并按转子磁场准确定向地控制，电动机才能获得最优的动态性能。本节介绍几种异步电动机矢量控制调速系统控制方案的仿真。

7.6.1 转差频率控制的异步电动机矢量控制系统仿真

转差频率控制的异步电动机矢量控制调速系统的原理如图 7-28 所示。该系统主电路采用了 SPWM 电压型逆变器，这是通用变频器常用的方案。转速采取了转差频率控制，即异步机定子角频率 ω_1 由转子角频率 ω 和转差角频率 ω_s 组成（$\omega_1=\omega+\omega_s$），这样在转速变化过程中，电动机的定子电流频率始终能随转子的实际转速同步升降，使转速的调节更为平滑。

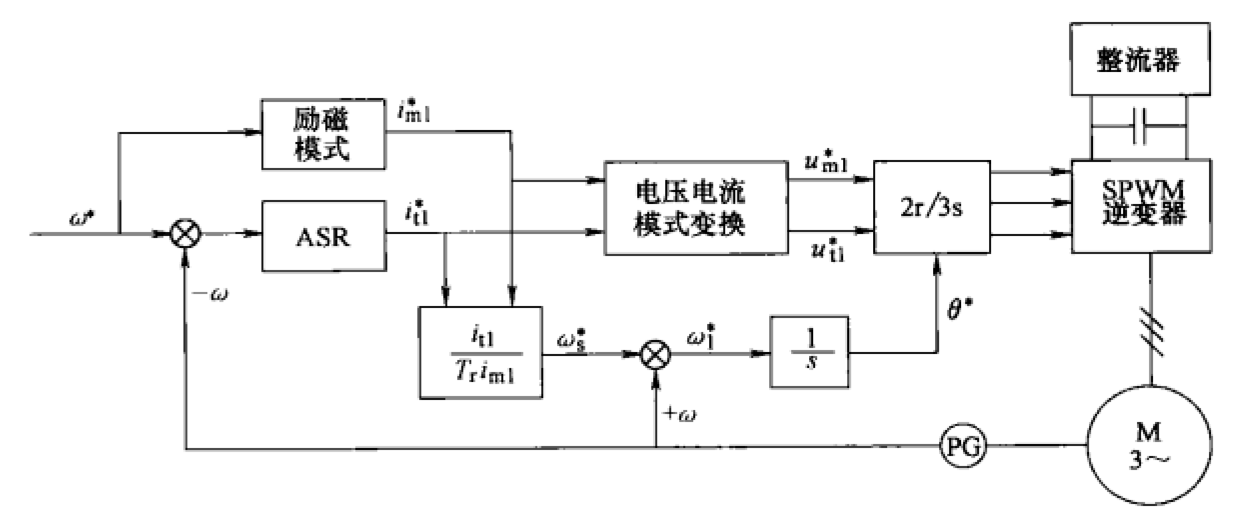


图 7-28 转差频率控制的矢量控制系统原理框图

从矢量控制方程［式（7-12）、式（7-13）和式(7-14)］中可以看到，在保持转子磁链 Ψ_r 不变的控制下，电动机转矩直接受定子电流的转矩分量 i_{1t}控制，并且转差 ω_s 可以通过定子电流的转矩分量 i_{1t}计算，转子磁链 Ψ_r 也可以通过定子电流的励磁分量 i_{1m}来计算。在系统中以转速调节器 ASR 的输出为定子电流的转矩分量 i_{1t}，并通过计算得到转差 ω_s。如果采取磁通不变的控制，则 $p\Psi_r=0$，由式（7-14）可得：$\Psi_r=L_m i_{1m}$，并由式（7-13）可得，$\omega_s=i_{1t}/T_r i_{1m}$。

由于矢量控制方程得到的是定子电流的励磁分量和转矩分量，而本系统采用了电压型逆变器，需要相应的将电流控制转换为电压控制，其变换关系为

$$u_{sm}=R_s i_{1m}-\omega_1\sigma L_s i_{st} \tag{7-17}$$

$$u_{st}=\omega_1 L_s i_{sm}+(R_s+\sigma L_s p)i_{s1t} \tag{7-18}$$

式中，u_{sm}、u_{st}为定子电压的励磁分量和转矩分量；σ 为漏磁系数，$\sigma=1-L_m/L_s L_r$。

u_{sm}、u_{st}经过二相旋转坐标系/三相静止坐标系的变换（2r/3s），得到 SPWM 逆变器的三相电压控制信号，并控制逆变器的输出电压。

上述系统的仿真模型如图 7-29 所示。

系统的控制部分由给定、PI 调节器、函数运算、二相/三相坐标变换、PWM 脉冲发生器等环节组成。其中给定环节有定子电流励磁分量 im*和转子速度 n*。放大器 G1、G2 和积分器组成了带限幅的转速调节器 ASR。电流电压模型转换由函数 Um*、Ut*模块实现。函数运算模块 ws*根据定子电流的励磁分量和转矩分量计算转差 ω_S，并与转子频率 ω 相加得到定子频率

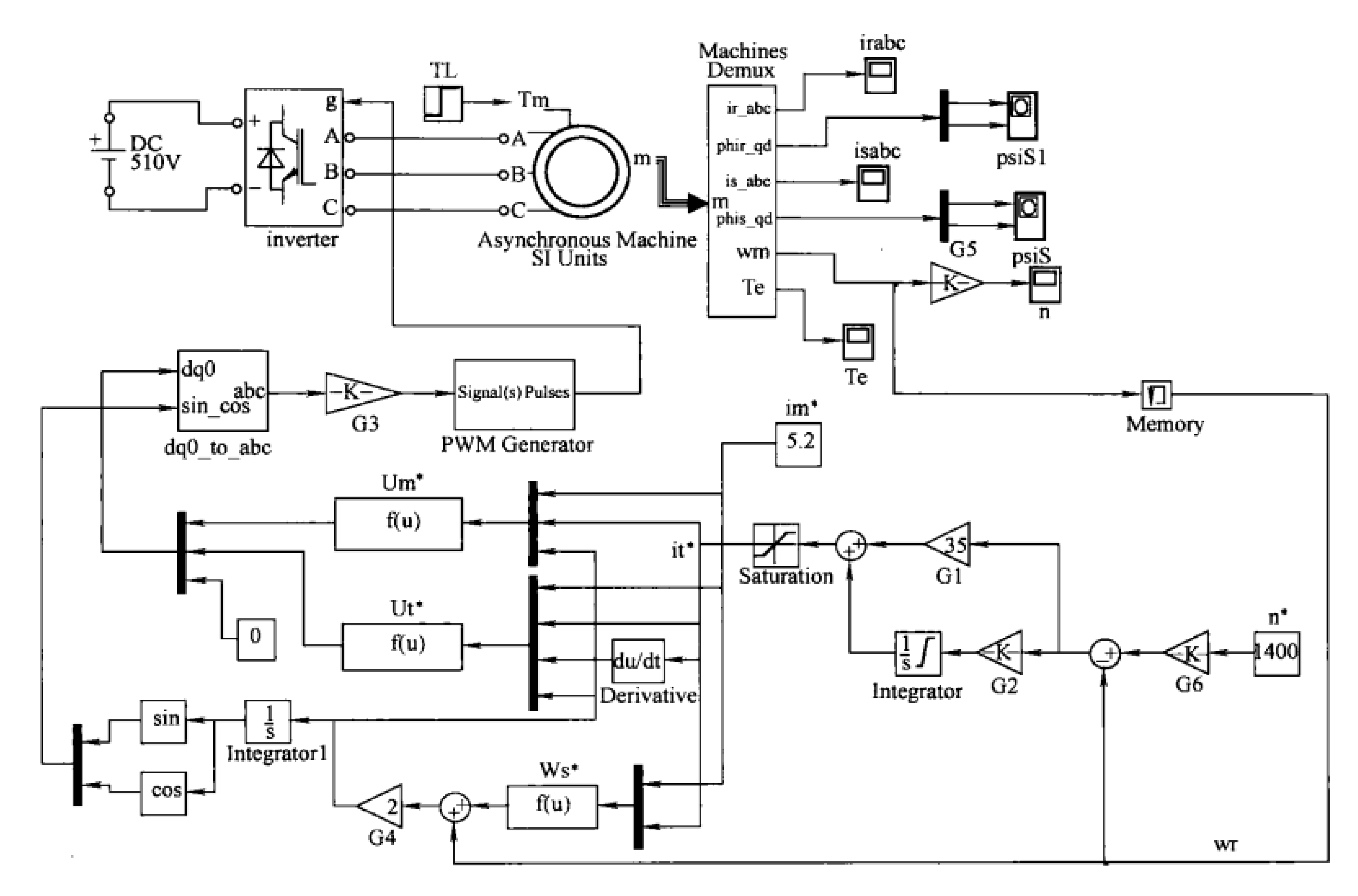


图 7-29　转差频率控制的矢量控制系统仿真模型

ω_1，再经积分器得到定子电压矢量转角 θ（theta）。模块 sin、cos 、dq0/abc 实现了二相旋转坐标系至三相静止坐标系的变换。dq0/abc 的输出是 PWM 发生器的三相调制信号，因为调制信号幅度不能大于 1，在 dq0/abc 输出后插入了衰减环节 G4。在模型调试时，可以先在此处断开，使系统工作在开环状态，将 PWM 发生器设置为内部模式，然后运行模型，根据 dq0/abc 输出和 PWM 发生器的三相调制输入信号幅值小于 1 的要求，计算 G4 的衰减系数。

【例 7-3】　对图 7-24 的模型仿真，电动机参数与例 7-2 相同。电流/电压变换模块（Um*、Ut*）的函数关系见式（7-18）、式（7-19），转差计算模块（ws*）：$\omega_s = i_t / T_r i_m$，有

$$L_s = L_m + L_{ls} = (0.069 + 0.002)\,\text{mH} = 0.071\,\text{mH}$$

$$L_r = L_m + L_{lr} = (0.069 + 0.002)\,\text{mH} = 0.071\,\text{mH}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} = \frac{0.071\,\text{mH}}{0.816\,\text{m}\text{H}} = 0.087$$

各放大器的参数取值见表 7-5。

表 7-5　转差频率矢量控制仿真模型放大器参数

放大器	放大倍数	备注	放大器	放大倍数	备注
G1	35		G4	2	极对数
G2	0.15		G5、G6	9.55	
G3	0.0076				

仿真了给定转速为 1400r/min 时的空载起动的过程，在起动后 0.45s 加载 TL = 65N · m。该系统是比较复杂的系统，收敛是仿真计算中经常出现的问题，经试用各种计算方法，选择了固定步长算法 ode5，步长取 10^{-5}。模型仿真的结果如图 7-30 所示。

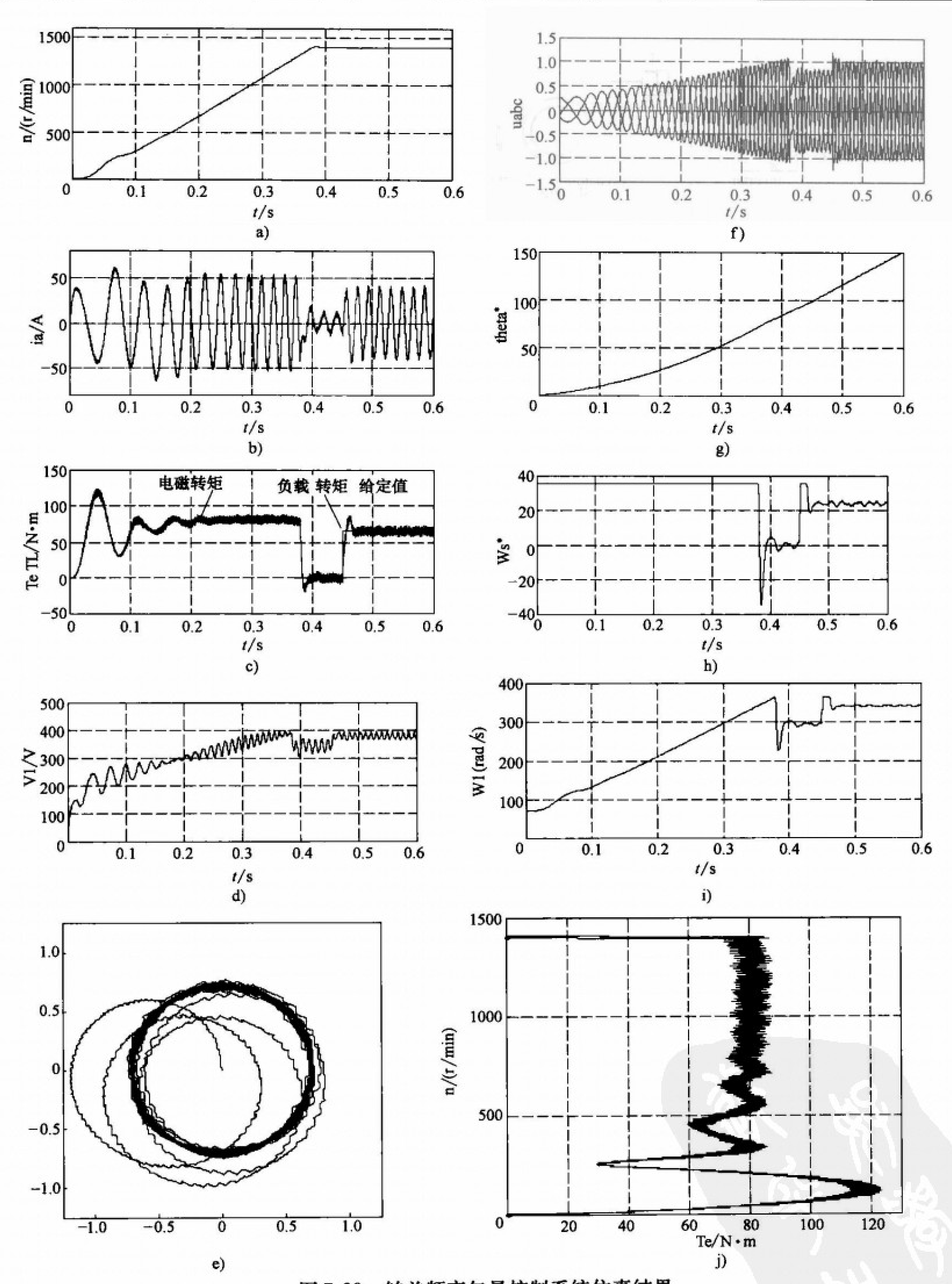


图 7-30 转差频率矢量控制系统仿真结果

a）转速响应 b）定子 A 相电流响应 c）电动机电磁转矩和负载转矩给定 d）电动机输入三相线电压有效值 e）定子磁链轨迹 f）SPWM 的三相调制信号 g）转子角 θ^* h）计算得到的转差频率 ω_s^*给定 i）逆变器调制频率 ω_1 （rad/s） j）转矩-转速特性

在仿真结果中，图 7-30a ~ d 反映了在起动和加载过程中电动机的转速、电流、电压和转矩的变化过程，在起动中，逆变器输出电压（线电压）逐步提高，转速上升，但是电流基本保持不变，$I_s \approx 50A/\sqrt{2} = 35A$，电动机以给定的最大电流起动。在 0.39s 时，转速稍有超调后稳定在 1400r/min，电流也下降为空载电流，逆变器输出电压也减小了。电动机在加载后电流和电压迅速上升，电动机转矩也随之增加，转速在略经调整后恢复不变。图 7-30f ~ i反映了各控制模块输出信号波形的变化，经 2r/3s 变换后的三相调制信号（u_{abc}）的幅值和频率在调节过程是逐步增加的，随频率的增加，转速逐步提高，信号幅值的提高，保证了电动机电流在起动过程中保持不变。图 7-30e 和图 7-30j 分别反映了电动机在起动过程中定子绕组产生的旋转磁场和电动机的转矩/转速特性，电动机在零状态起动时，电动机磁场有一个建立过程，在建立过程中磁场变化是不规则的，这也引起了转矩的大幅度变化，在 0.2s 后，磁场呈规则的圆形。改变励磁的给定值 i_m^*，圆形旋转磁场的半径也有变化，为了较清楚地看到 PWM 调制引起的电动机磁链的脉动情况，PWM 调制频率取得较低，如果调制频率提高，圆形旋转磁场的脉动将减小。电动机的转矩/转速特性反映了通过转差频率控制使电动机保持了最大转矩起动，并且改变 ASR 的输出限幅 i_t^*，最大转矩可以调节。为了减少仿真需要的时间，仿真中减小了电动机的转动惯量，但是过小的转动惯量，容易使系统发生振荡，读者可以通过调节参数观察参数变化对系统的影响。仿真的结果表明，采用转差频率控制的矢量控制系统具有良好的控制性能。

7.6.2　带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统仿真

带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统的电气原理如图 7-31 所示。在图中，主电路采用了电流滞环控制型逆变器（参见 5.3.2 节电流跟踪型逆变器）。在控制电路中，在转速环后增加了转矩控制内环，转速调节器 ASR 的输出是转矩调节器 ATR 的给定 T_e^*，而转矩的反馈信号 T_e，则通过矢量控制方程［式（7-12）］计算得到。电路中的磁链调节器 ApsiR 用于对电动机定子磁链的控制，并设置了电流变换和磁链观测环节。ATR 和 ApsiR 的输出分别是定子电流的转矩分量 i_{st}^*和励磁分量 i_{sm}^*。i_{st}^*和 i_{sm}^*经过 2r/3s 变换后得到三相定子电流的给定值 i_{sA}^*、i_{sB}^*、i_{sC}^*，并通过电流滞环控制 PWM 逆变器控制电动机定子的三相电流。

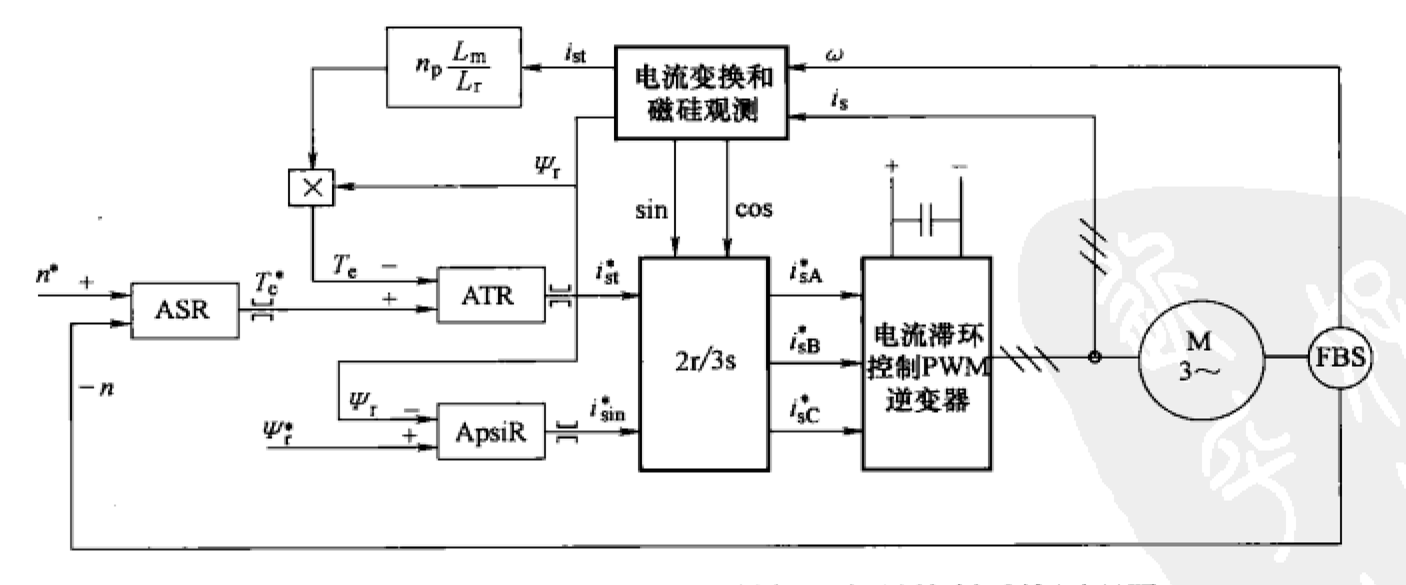


图 7-31　带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统原理图

带磁链和转矩闭环的矢量控制系统仿真模型如图 7-32 所示。其中直流电源 DC、逆变器 inverter、电动机 motor 和电动机测量模块组成了模型的主电路，逆变器的驱动信号由滞环脉

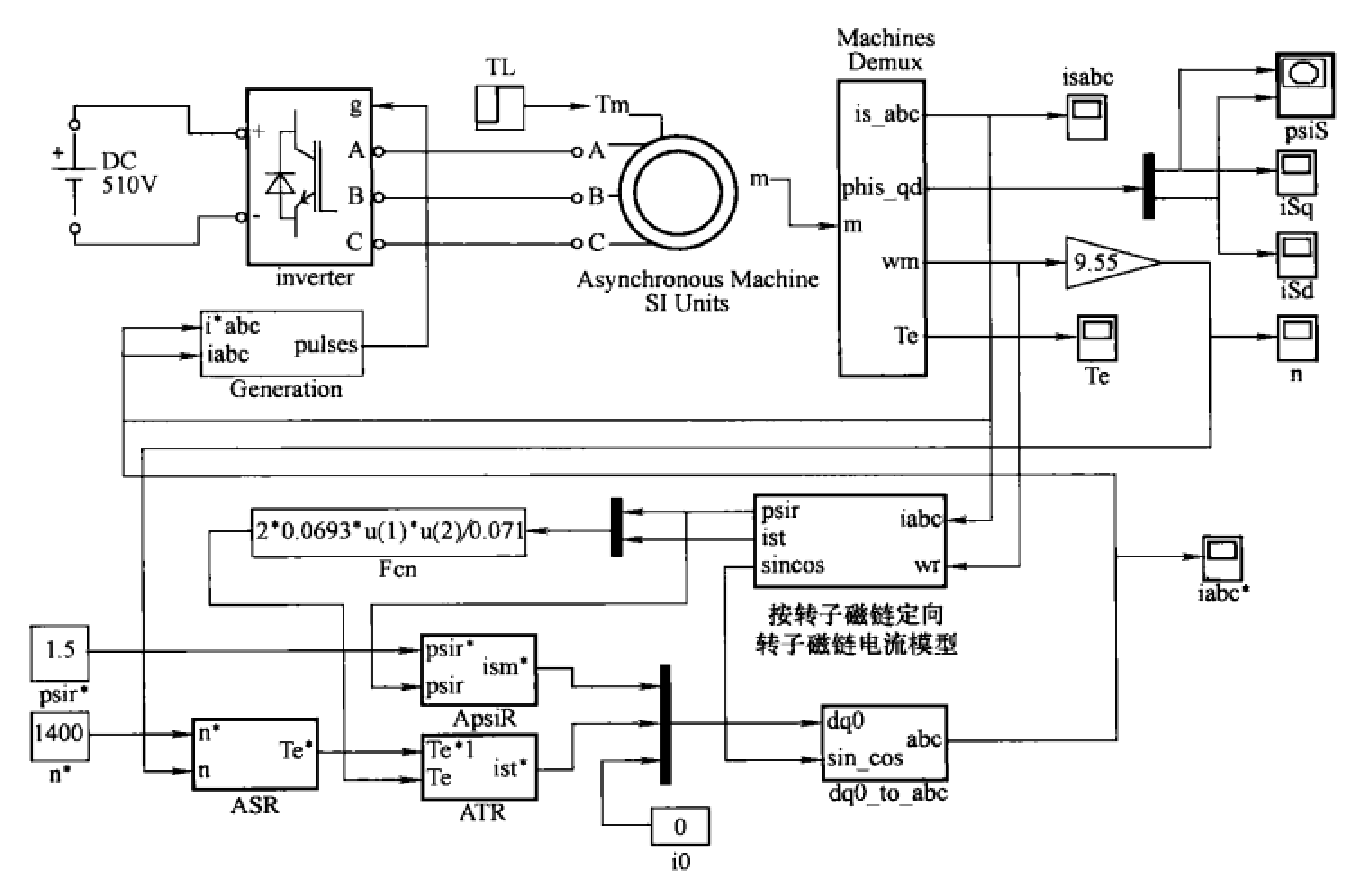


图 7-32　带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统仿真模型

冲发生器模块产生，滞环脉冲发生器模块结构如图 5-64 所示。三个调节器 ASR、ATR 和 ApsiR 均是带输出限幅的 PI 调节器（见图 7-33）。转子磁链观测使用二相同步旋转坐标系上的磁链模型（见图 7-19），函数模块 Fcn 用于计算转矩［见式（7-12）］，dq0-to-abc 模块用于 2r/3s 的坐标变换。

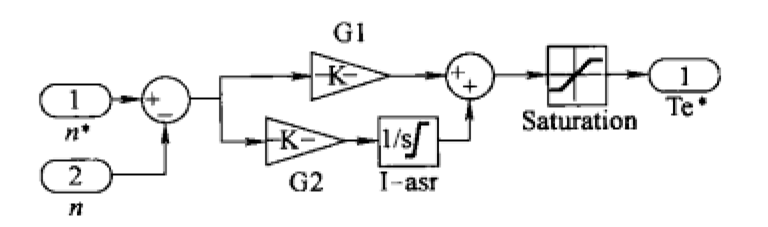


图 7-33　PI 调节器结构

【例 7-4】　仿真图 7-31 带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统，电动机参数同例 7-2。调节器参数见表 7-6。模型的仿真算法为 ode23tb。

表 7-6　调节器参数参考值

调　节　器	比例放大器 G1 放大倍数	积分放大器 G2 放大倍数	积分器限幅		调节器输出限幅	
			上限	下限	上限	下限
转速调节器 ASR	3.8(G1)	0.8(G2)	80	-80	75	-75
转矩调节器 ATR	4.5(G3)	12(G4)	60	-60	60	-60
磁链调节器 ApsiR	1.8(G5)	100(G6)	15	-15	13	-13

在给定转速为 1400r/min，空载起动，在 0.6s 时加载 60N · m，系统的仿真结果如图 7-34所示。其中图 7-34a ~ c 分别为电动机转速、电流、转矩的曲线，图 7-34d ~ f 分别为三个调节器的输出信号波形。在波形中可以看到，在矢量控制下，转速上升平稳，加载后略有下降但随即恢复，在 0.35s 达到给定转速时和 0.6s 加载时，系统调节器和电流、转矩都有相应的响应。由于 ATR 和 ApsiR 都是带限幅的 PI 调节器，在起动中两个调节器都处于饱和

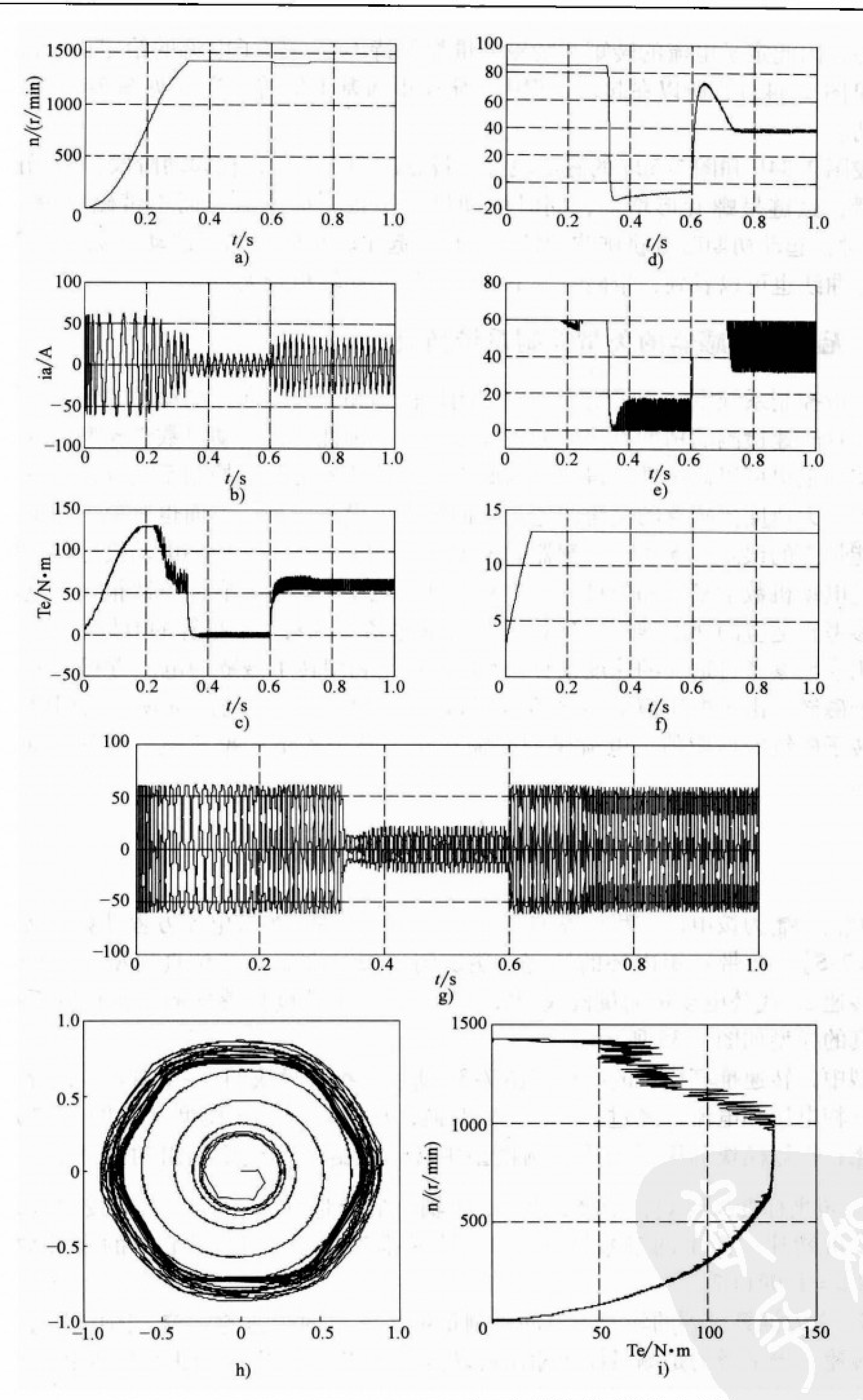


图 7-34　带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统仿真结果

a）转速响应　b）A 相电流波形　c）电动机输出转矩　d）转速调节器输出

e）转矩调节器输出　f）磁链调节器 ApsiR 输出　g）经 2r/3s 变换的

三相电流给定波形　h）定子磁链轨迹　i）转矩-转速曲线

限幅状态，因此定子电流的转矩和励磁分量都保持不变，定子电流的给定值 i_{sA}^*、i_{sB}^*、i_{sC}^*也不变（见图 7-34g），所以在起动过程中，定子电流基本保持不变（见图 7-34b），实现了恒电流起动。

比较图 7-34h 和图 7-30e 的磁链轨迹，带磁链调节器后，在起动阶段，磁场的建立过程比较平滑，磁链呈螺旋形增加，同时电动机转矩也不断上升；而不带磁链调节器（见图 7-30e）时，起动初期磁链轨迹波动较大，也引起了转矩的大幅度波动（见图 7-30c）。从转矩－转速曲线也可以看到，带磁链调节器的系统起动转矩较大。

7.6.3 无速度传感器的矢量控制系统仿真

在矢量控制系统中，为了实现转速的闭环控制和磁场定向，电动机的转速检测是必不可少的，并且转速检测的精度直接影响磁场定向的准确性。从电动机数学模型可以看出，电动机转速实际上也可以通过推算得到，因此无速度传感器的矢量控制系统成为交流调速的重要研究内容。无速度传感器的交流调速一方面减少了设备，另一方面也避免了速度传感器检测本身可能带来的误差。无速度传感器的速度推算基本上都是在检测电动机电压、电流的基础上，通过电动机数学模型和矢量控制方程来推算电动机转速，它的方法很多，这里仅举例介绍模型参考自适应的速度推算（MRAS），并通过仿真观察速度推算的效果。

采用模型参考自适应的速度推算（MRAS）是利用转子磁链的电压方程和电流方程分别计算转子磁链，由于电压模型不含角速度 ω 项，而电流模型包含 ω 项。故用电压模型的输出作为转子磁链的期望值，电流模型的输出作为转子磁链的推算值，计算电动机转速 ω_r，其关系为

$$\omega_r = \left(K_P + \frac{K_I}{S}\right)\left(\hat{\Psi}_{\alpha r}\Psi_{\beta r}^* - \hat{\Psi}_{\beta r}\Psi_{\alpha r}^*\right) \tag{7-19}$$

式中，$\Psi_{\alpha r}^*$、$\Psi_{\beta r}^*$为按电压方程计算的转子磁链；$\hat{\Psi}_{\alpha r}$、$\hat{\Psi}_{\beta r}$为按电流方程计算的转子磁链。

【例 7-5】 在带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统仿真模型（见图 7-31）中，以推算转速 ω_r 代替电动机测量模块的转速值，观察无速度传感器的矢量控制系统的控制效果，仿真的模型如图 7-35 所示。

模型中，转速推算模块的组成如图 7-36 所示。推算模块的 1～4 输入端，分别接入电动机定子三相电压和电流，经过 3s/2s 坐标变换，再由磁链电压模型（见图 7-22）计算得到 $\Psi_{\alpha r}^*$、$\Psi_{\beta r}^*$；推算模块利用了矢量控制模型中转子磁链电流模型输出的磁链信号 psir 和 sincos，经直角坐标变换得到转子磁链在 α、β 轴上的分量 $\hat{\Psi}_{\alpha r}$、$\hat{\Psi}_{\beta r}$，然后按式（7-19）计算得到电动机转速。模型的参数同例 7-4。转速推算模块中 PI 调节器的参数取 G7 = 4500（G1），G8 = 1.98（G2）。

图 7-37 为推算得到的转速与电动机测量模块输出的转速的比较，图中带有小幅波动的是推算转速，较平滑的是测量模块输出的转速，两者差异很小。图 7-38 是以推算得到的转速作为转速反馈和以电动机测量模块输出的转速作为转速反馈信号时控制效果的比较，推算速度矢量控制可以取得几乎相同的控制效果，只是电动机加载后的恢复时间较长，这与 K_I 的取值有关，较大的 K_I 恢复时间较短，但是推算转速的波动加大，PI 调节器的 K_p 和 K_I 两个参数选择是很关键的，需要多次试凑修正，而使用仿真是较方便的，这是仿真的优点。

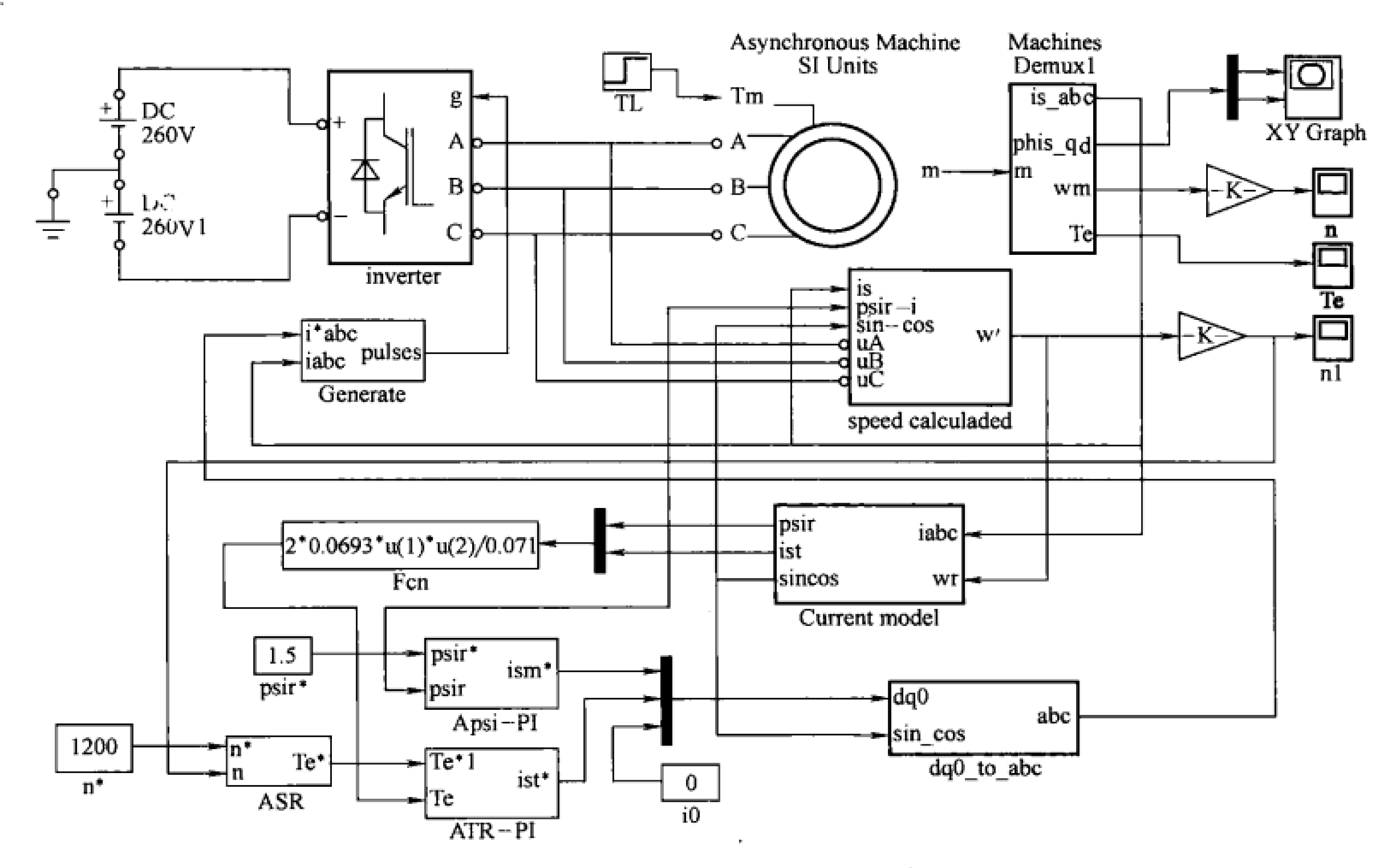


图 7-35　无速度传感器的矢量控制系统仿真模型

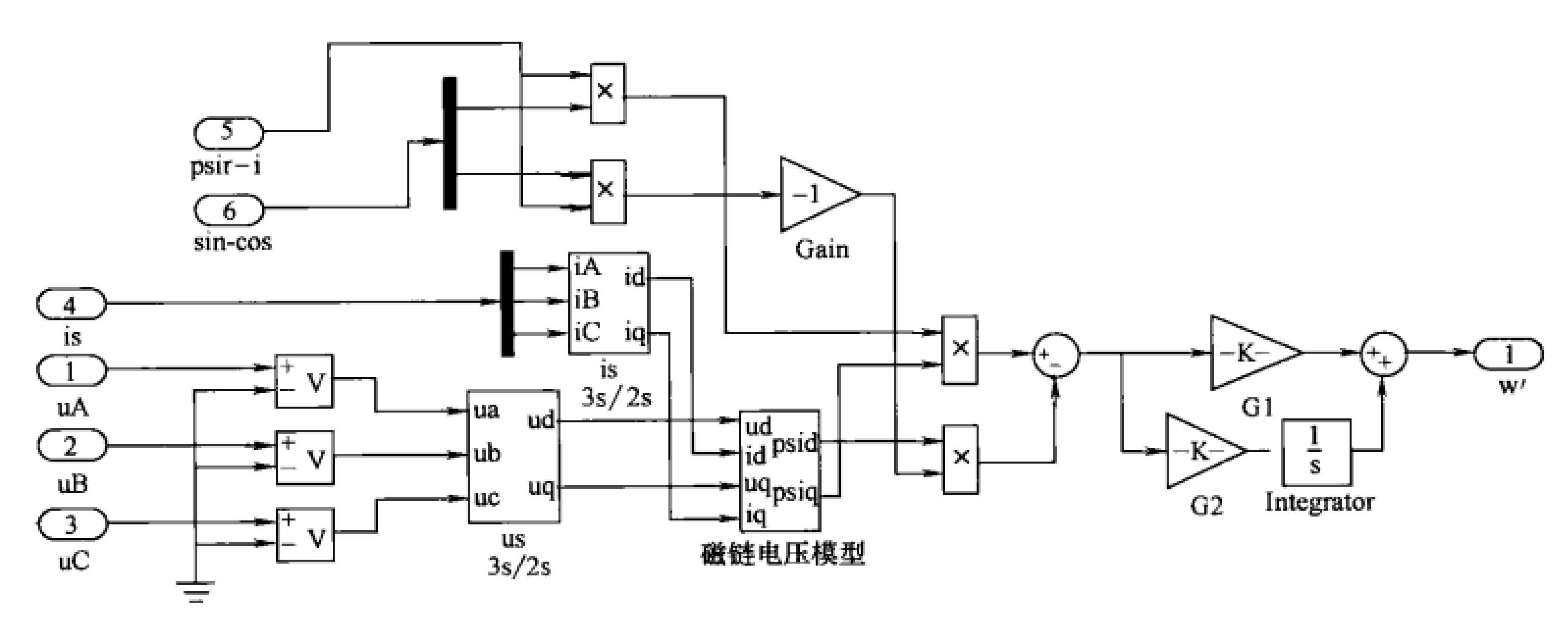


图 7-36　转速推算模块组成

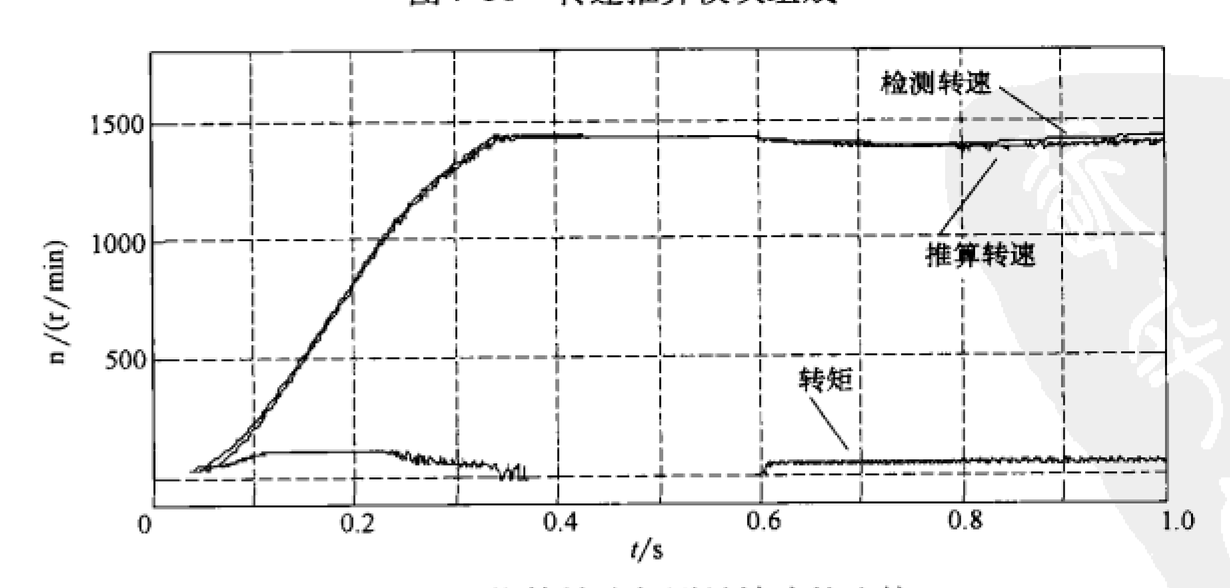


图 7-37　推算转速与测量转速的比较

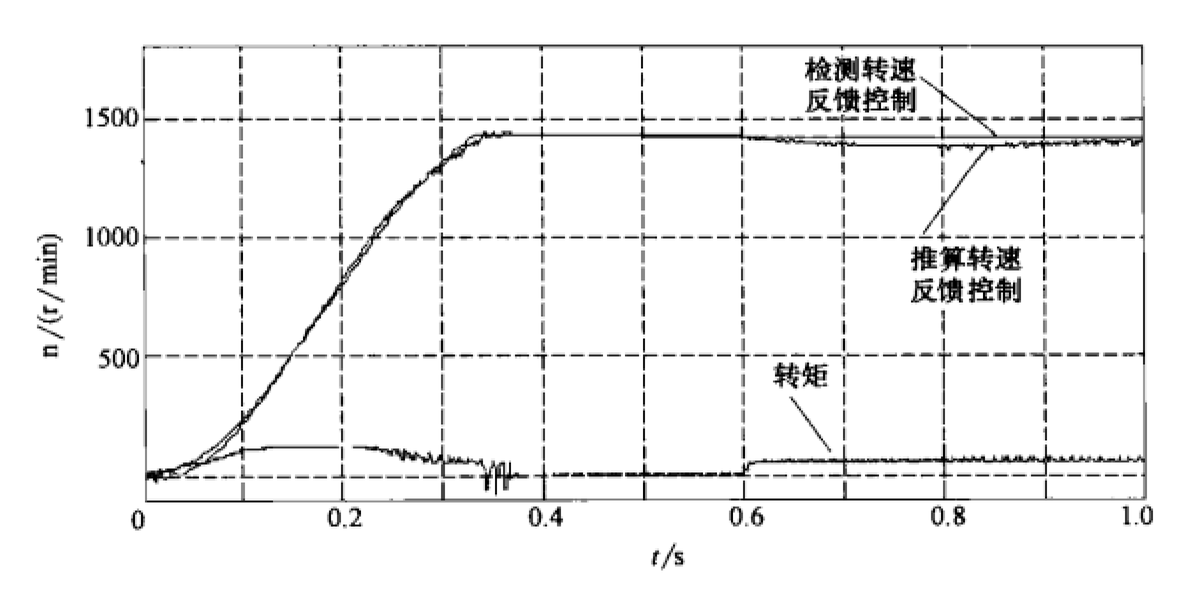


图 7-38　无速度传感器和有速度传感器矢量控制系统比较

图 7-39 是无转速检测矢量控制系统的转速和转矩响应。其中图 7-39b 是转矩响应曲线，从图中可以看到 0 ~0. 15s 是电动机的反向起动过程。在起动过程中，通过转速观测器计算的转速与电动机测量模块检测的转速有偏差（见图 7-39a)，从 0. 15 ~0. 2s 为反转稳定运行阶段，在 0. 2s 时系统给定从反转 500r/min 切换到正转 500r/min，电动机转速开始下降，在 0. 31s 左右，电动机从反转进入正转的起动阶段，在这阶段中电动机始终保持最大转矩，直到正转起动完毕，并且在这个过程中，观测转速与检测转速几乎没有差别。

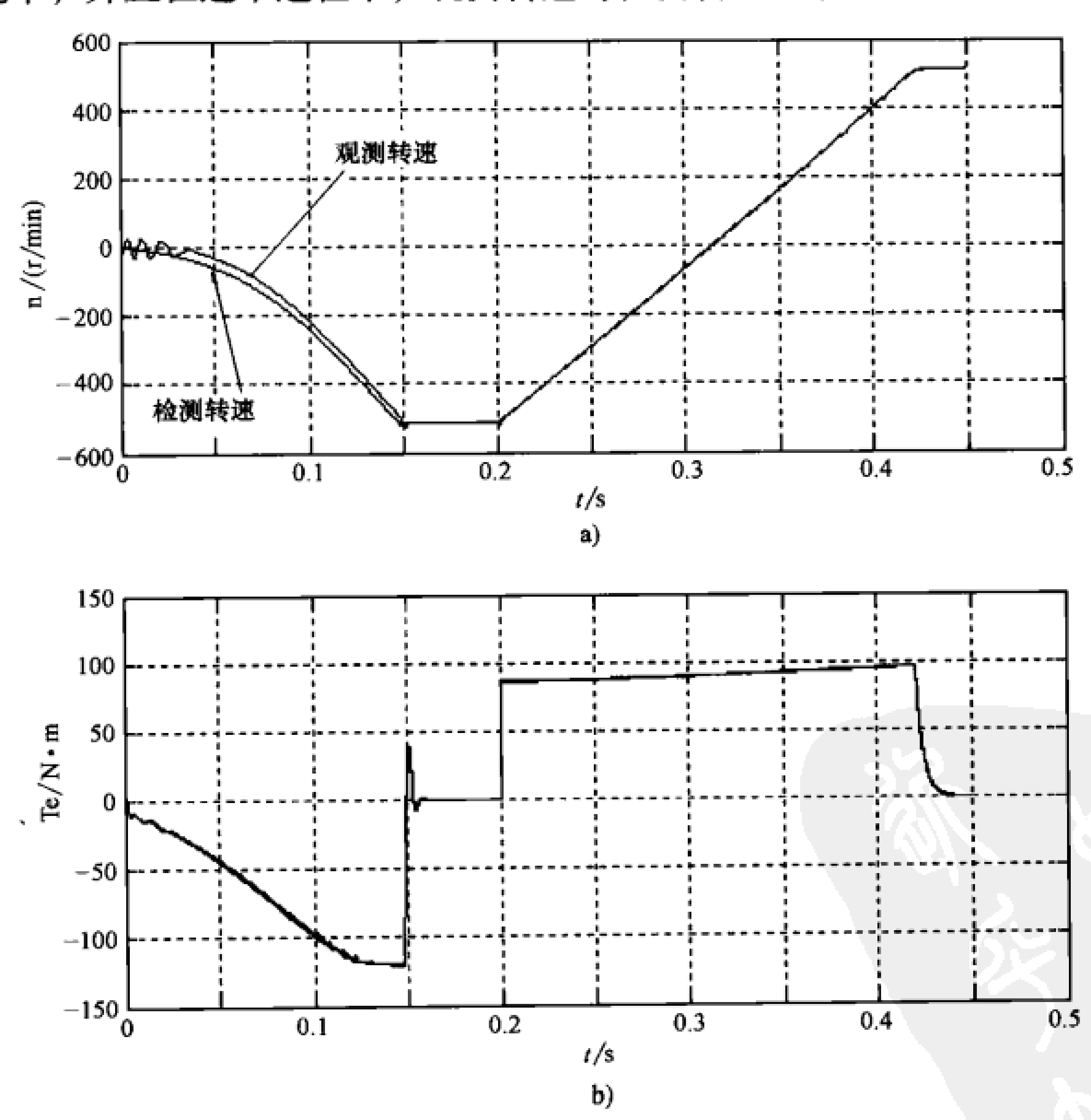


图 7-39　无速度检测矢量控制系统正反转调节过程

a）反转到正转过程中观测转速与检测转速的比较　b）反转到正转的转矩响应

7.7　永磁同步电动机的仿真

永磁同步电动机由于谐波少、转矩的精度高，常用于伺服系统和高性能的调速系统。永磁同步电动机的定子绕组与一般交流电动机的定子绕组相同，转子采用永久磁铁，因此转子磁链（磁通）是恒定的，电动机方程（电压方程、磁链方程和转矩方程）都较异步电动机简单（参考 4.3.3 节），对控制而言则无需计算磁链的观测模型。永磁同步电动机调速系统常用的有两种系统：正弦波（Sinusoidal）系统和梯形波（Trapezoidal）系统。

7.7.1　正弦波永磁同步电动机变频调速系统仿真

正弦波永磁同步电动机变频调速在基频以下工作在恒转矩工作区，最简单的控制方案是使定子电流的励磁分量 $i_{sd}=0$，因此按转子磁链定向并使 $i_{sd}=0$ 的正弦波永磁同步电动机变频调速系统原理如图 7-40 所示。永磁同步电动机定子由三相 SPWM 逆变器供电，转子位置传感器 PG 检测转子转速 ω_r 和转角 θ_r，并计算 $\sin\theta_r$ 和 $\cos\theta_r$。由转速调节器 ASR 和电流调节器 ACR 得到定子电压的转矩分量 u_{sq}^*，在设定励磁分量 u_{sd}^*为“0”的条件下经二相旋转/三相静止坐标变换 2r/3s，得到 SPWM 调制器的三相电压调制信号。定子电流经检测和三相静止/二相旋转坐标变换 3s/2r，得到定子电流的转矩分量 i_{sq}作为电流的反馈信号。

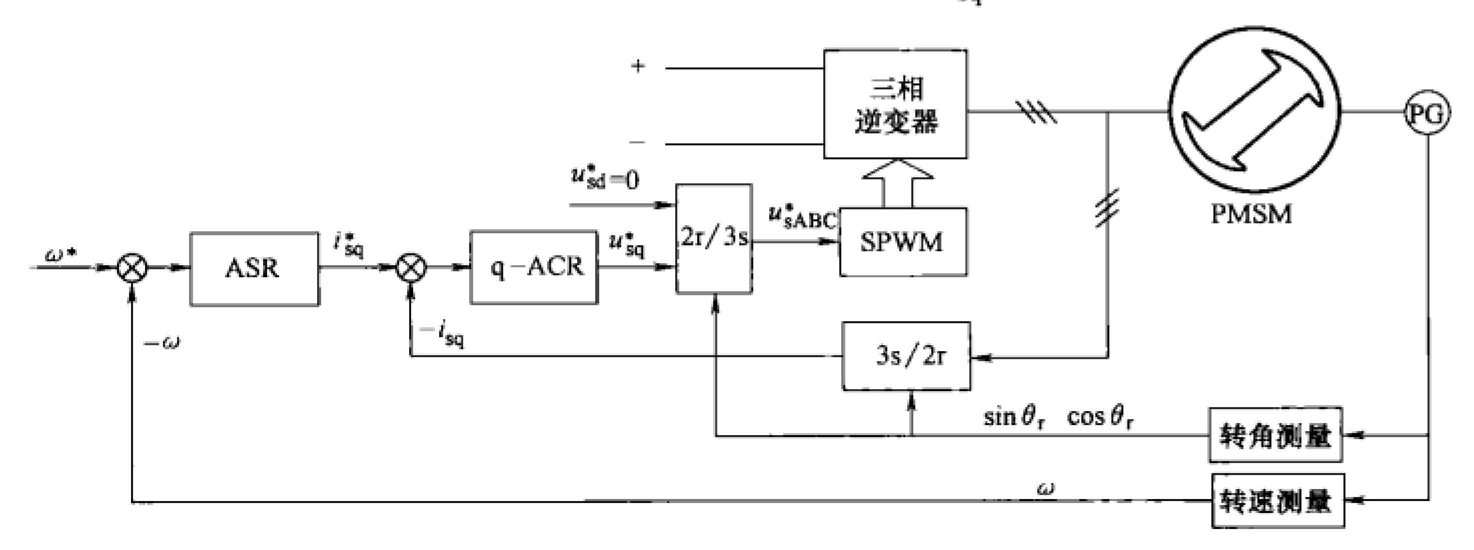


图 7-40　正弦波永磁同步电动机变频调速系统原理图

系统的仿真模型如图 7-41 所示，系统主电路由模块直流电源 DC、逆变器（Universal Bridge）和永磁同步电动机（Permanent Magnet Synchronous Machine）组成，永磁同步电动机的励磁类型选择正弦波 Sinousoidal（参考图 4-27）。电动机模块参数、转速调节器 ASR 和电流调节器 q-ACR 参数见表 7-7，电动机转速、电流和转角信号都取自永磁同步电动机的检测模块。模型中放大器 Gain1 用于调整 dqo-abc 模块输出三相调制信号幅值，Gain2 用于调整定子三相电流反馈信号幅值，Gain2 用于设定电动机极对数，图中设定极对数 $p=1$。

表 7-7　正弦永磁同步电动机调速系统模型参数

永磁同步电动机	定子电阻 $R_s=2.875\Omega$	励磁磁通　0.175Wb
	定子 d 轴电感 $L_d=0.0085$H	定子 q 轴电感 $L_q=0.0085$H
	转动惯量 $J=0.008\text{kg}\cdot\text{m}^2$	极对数 $p=1$
转速调节器	比例系数 $K_{pn}=11.7$	积分系数 $K_{in}=140$
电流调节器	比例系数 $K_{pi}=10.7$	积分系数 $K_{ii}=80$

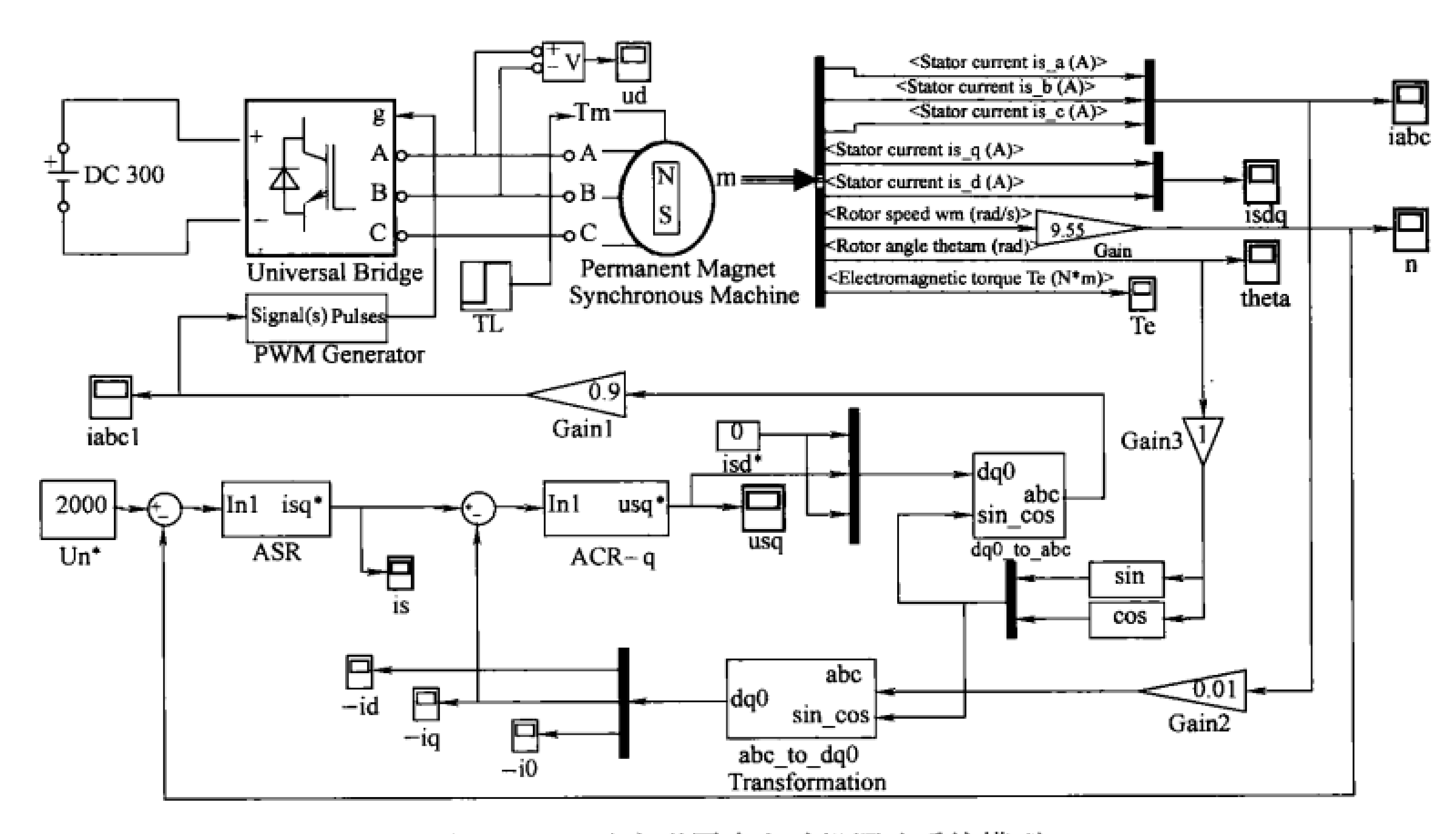


图 7-41　正弦永磁同步电动机调速系统模型

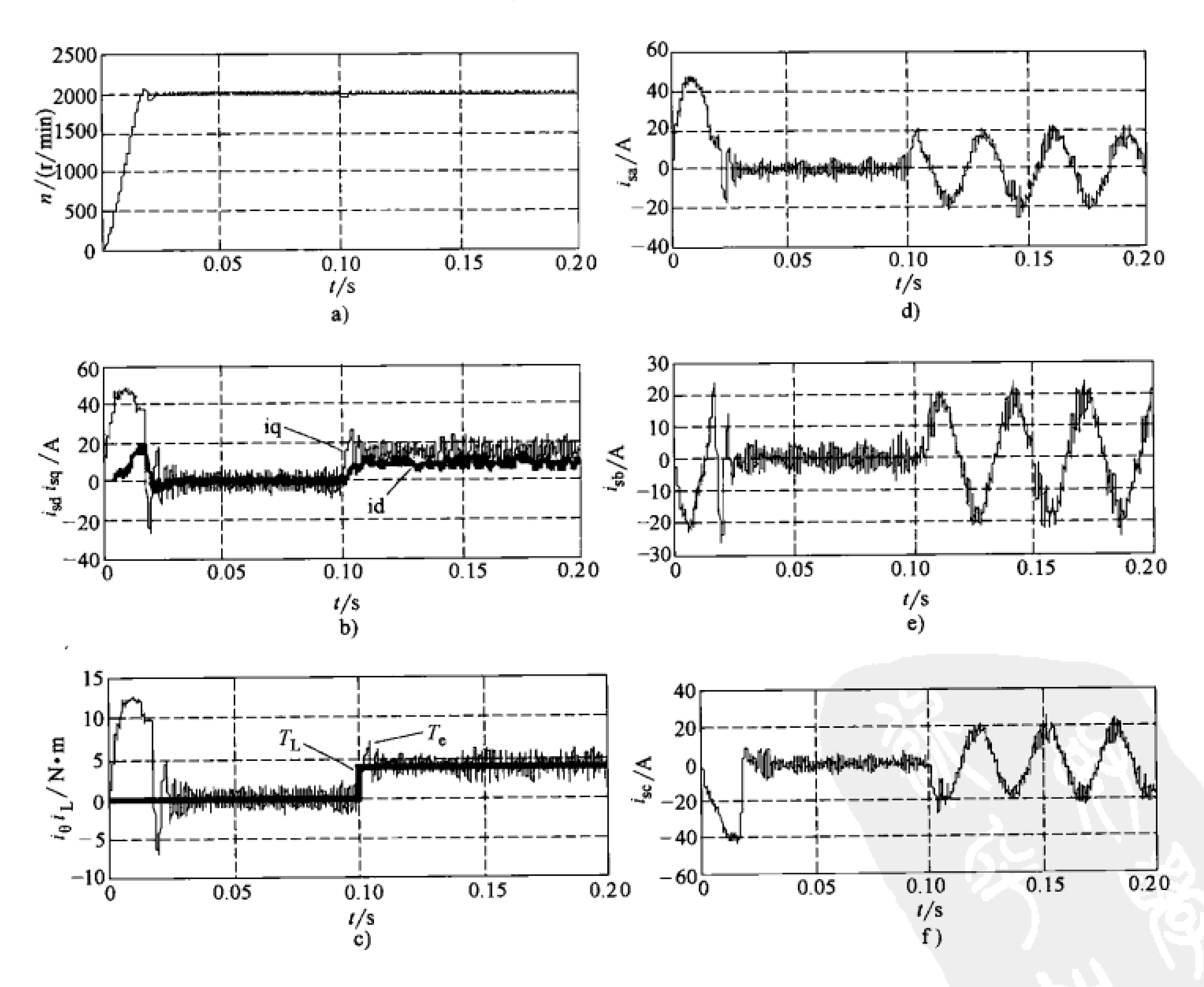


图 7-42　正弦永磁同步电动机调速系统波形

a）转速　b）电流转矩分量和励磁分量　c）电磁转矩和负载转矩　d）A 相电流　e）B 相电流　f）C 相电流

模型仿真结果如图 7-42 所示，其中图 7-42a 为转速响应，电动机以空载起动，0.1s 时加载 4N·m，转速略有波动。图 7-42b 为定子电流的转矩分量 i_{sq} 和励磁分量 i_{sd}，图 7-42c 为电动机转矩，其中 T_L 为给定的负载转矩，T_e 为电磁转矩响应。图 7-42d ~ f，分别为三相定子电流波形。

7.7.2　梯形波永磁同步电动机变频调速系统仿真

梯形波永磁同步电动机也称无刷直流电动机（Brushless DC Motor，BLDM），在结构上与永磁交流同步电动机基本相同，但其转子磁极采用了瓦形磁钢，因此气隙磁场呈梯形波，其定子采用集中整距绕组，并且通以矩形波电流。

梯形波永磁同步电动机与直流电动机比较，一般直流电动机的励磁在定子上，梯形波永磁同步电动机的励磁在转子上，并且用永磁体代替，而将直流电动机转子上的电枢绕组做在了定子上。直流电动机是通过电刷和换向器组成的机械式逆变器将直流电变换为电枢绕组需要的交流电，而梯形波永磁同步电动机的电枢绕组在定子上，因此可以给定子上的电枢绕组直接通交流电，不再需要机械式的换向器，故称为无刷直流电动机，正因为如此，无刷直流电动机与直流电动机有相同的工作原理，可以进行调压调速。直流电动机转子的交流电频率是随转速变化的，因此无刷直流电动机定子绕组的交流电频率也需要随转速变化，即无刷直流电动机工作时也需要调压调频，因此定子绕组一般由电力电子变频器供电。由于交流电动机的转速随频率变化，而无刷直流电动机的频率是随转速而变化，这造成了无刷直流电动机控制的特殊性，需要通过转子磁极的位置来决定无刷直流电动机定子绕组的通电时刻。

梯形波永磁同步电动机调速系统的仿真模型如图 7-43 所示，系统主电路由模块直流电源 U_s、逆变器（Universal Bridge）和永磁同步电动机（Permanent Magnet Synchronous Machine）组成，永磁同步电动机的励磁类型选择梯形波 Trapezoidal（参考图 4-27）。模型控制

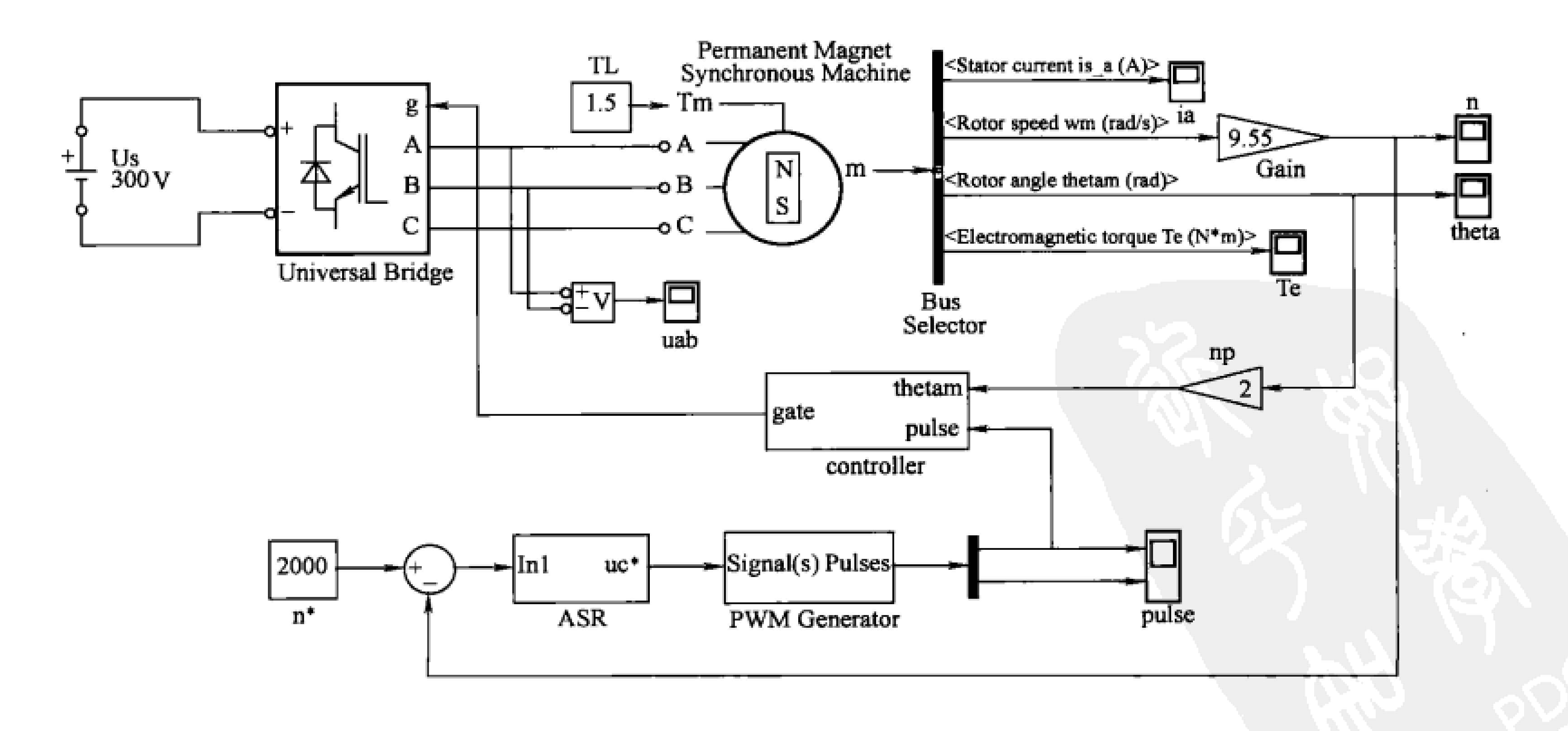


图 7-43　梯形波永磁同步电动机调速系统仿真模型

部分由转速给定模块 n＊、转速调节器模块 ASR、PWM 脉宽调制器和控制器单元 controller 等组成，转速调节器输出脉宽控制信号，并通过脉宽调制器调节脉冲宽度，用于根据转速调节无换向器电动机的三相电压。控制器单元 controller 的作用是根据转子磁极位置分配电动机三相绕组的通电，即控制逆变器模块 6 个开关器件的开关次序。controller 模块的结构如图 7-44 所示，由电动机观测得到的转子位置角（thetam），通过 Rounding Function、Relational Operator 等模块运算得到以 2π 为周期、每隔 $\pi/3$ 产生一个脉冲宽度为 $2\pi/3$ 的方波脉冲，该方波脉冲与脉宽调制器产生的脉宽信号（pulse）经过与门（AND）运算总共产生 6 路驱动信号，由 gate 端输出。模型中放大器 np 用于设置电动机的极对数，其他模块参数见表 7-8。

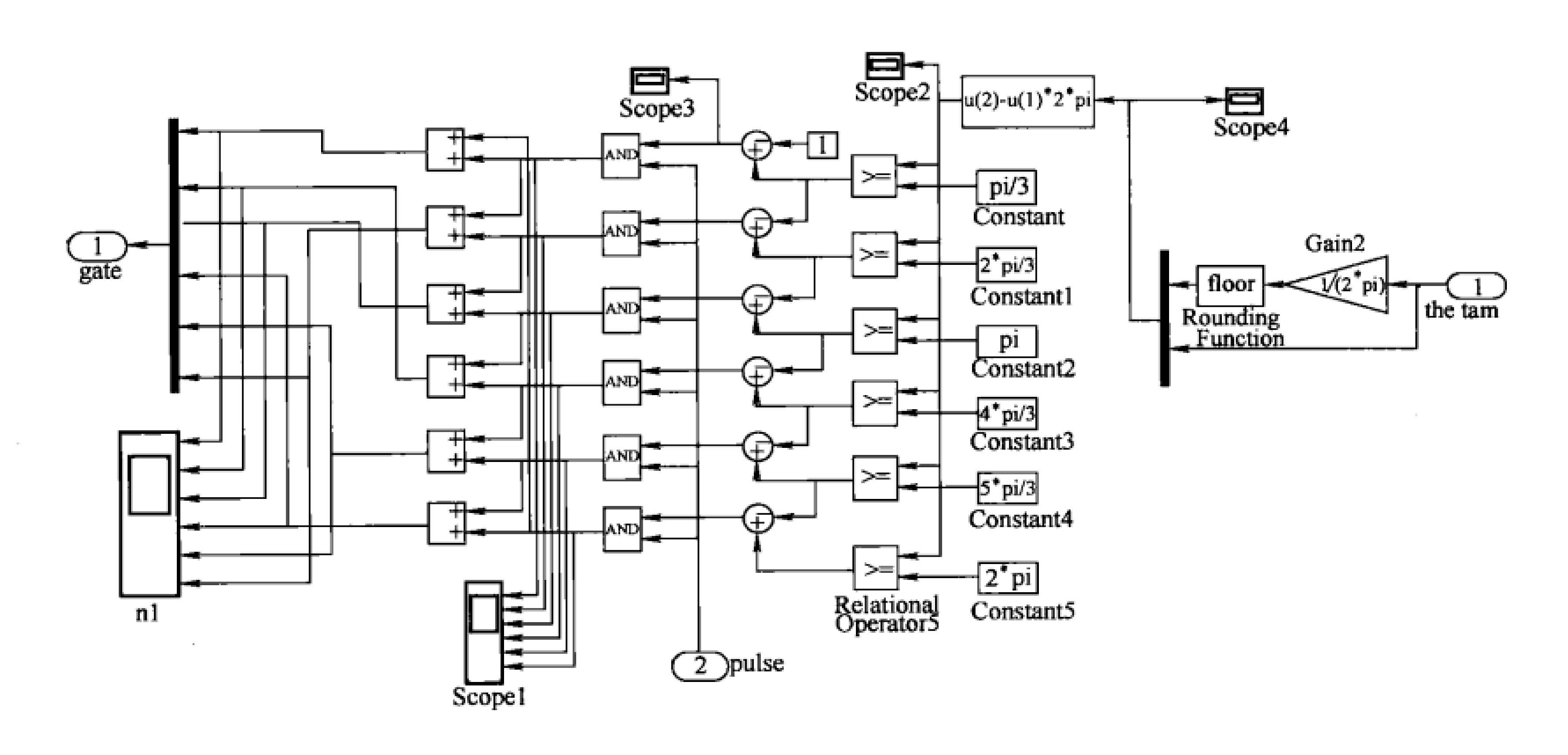


图 7-44 controller 模块结构

表 7-8 梯形波永磁同步电动机调速系统模型参数

永磁同步电动机 电压 300V	定子电阻 $R_s=4.765\Omega$	励磁磁通 0.1848Wb
	定子电感 $L_s=0.0085\text{H}$	励磁脉冲宽度 120°
	转动惯量 $J=0.008\text{kg}\cdot\text{m}^2$	极对数 $p=2$
转速调节器	比例系数 $k_p=10.7$	积分系数 $k_i=0.15$

模型的仿真结果如图 7-45 所示，其中图 7-45a 为给定 2000r/min 带载 1.5N · m 起动时的转速响应，起动时电动机转速略有超调后进入稳态，稳态转速波动很小。图 7-45b 为定子一相线电压 $u$ab 的波形，图 7-45c 为电动机转矩。图 7-45d ~ f 分别为三相定子电流波形，可以看到无换向器电动机电流呈交流方波，由于电压采用了 PWM 控制，在 120°导通区间内电流有脉动，这使电动机电压和转矩也产生一定脉动。

图 7-45　梯形波永磁同步电动机调速系统仿真波形

a）转速　b）电压　c）转矩　d）A 相电流　e）B 相电流　f）C 相电流



第 8 章　离散控制调速系统仿真

随着微机芯片技术的迅速发展，直流和交流调速系统都向全数字化发展，这样的系统主电路变流器和电动机参数是连续的模拟量，而信号经过采样，控制器采用离散算法，整个系统是模拟和离散的混合系统。在第 7 章中介绍的系统，调节器采用连续的传递函数，属于连续系统仿真。在新版 SimPowerSystems 中有一个 Application Libraries 模型库，内有直流传动（DC driver）和交流传动（AC driver）两个子模型库，库中包含了常见的各种直流和交流调速系统模块，并且附有仿真举例（Demo），这些调速系统模块采用了离散化的控制模式。表 8-1 和表 8-2 列出了这些系统模块的名称和功能，这些系统是用 SIMULINK 中的元器件模块连接并打包组成的，本章介绍这个模型库中部分调速系统模块的结构和应用。

表 8-1　直流调速系统模块

直流调速系统 SimPowerSystems/Application Libraries/DC driver		
	系统模块名	功　能
1	Four-Quadrant Single-Phase Rectifier DC Drive	晶闸管单相整流器四象限直流调速系统
2	Four-Quadrant Chopper DC Drive	IGBT-PWM 斩波控制四象限直流调速系统
3	Four-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive	晶闸管三相整流器四象限直流调速系统
4	One-Quadrant Chopper DC Drive	IGBT-PWM 斩波控制一象限直流调速系统
5	Two-Quadrant Chopper DC Drive	IGBT-PWM 斩波控制两象限直流调速系统
6	Two-Quadrant Single-Phase Rectifier DC Drive	晶闸管单相整流器两象限直流调速系统
7	Two-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive	晶闸管三相整流器两象限直流调速系统

表 8-2　交流调速系统模块

交流调速系统 SimPowerSystems/Application Libraries/AC driver		
	系统模块名	功　能
1	DTC Induction Motor Drive	直接转矩控制交流调速系统
2	Field-Oriented Control Induction Motor Drive	磁场定向控制交流调速系统
3	PM Synchronous Motor Drive	永磁同步电动机调速系统
4	Self-Controlled Synchronous Motor Drive	自适应控制同步电动机调速系统
5	Six-Step VSI Induction Motor Drive	六节拍 VSI 异步电动机调速系统
6	Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive	矢量控制电压型 PWM 异步电动机调速系统

8.1　两象限三相整流器直流调速系统模块

两象限三相整流器直流调速系统模块（Two-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive）的图标如图 8-1 所示，图 8-2 所示是直流调速系统的模型。晶闸管三相全桥整流器、平波电

抗器和直流电动机组成系统的主电路；转速控制器、电流控制器、触发单元和转换开关组成系统的控制电路。系统有转矩和转速两种控制方式，两种控制方式通过转换开关切换。如果是转速控制方式，转速给定和检测值通过转速控制器的比较和 PI 运算得到电流给定值。如果是转矩给定方式，转换开关首先将输入的转矩给定信号变换为电枢电流给定信号。电流控制器根据转换开关输出的电流给定信号和电流检测信号，经过电流 PI 控制器输出控制角移相信号，再经触发单元产生脉冲控制晶闸管整流器，通过脉冲相位控制整流器输出的直流电压，进行直流电动机的调电枢电压调速，在转矩给定方式时，转速控制器不起作用。模型是离散的，并且转速控制器和电流控制器采用了不同的采样时间，模块仿真了一个离散控制的直流调速系统，电动机可以工作在Ⅰ、Ⅳ象限，在第Ⅰ象限，电动机工作于电动状态，在第Ⅳ象限，电动机工作在倒拉制动状态。

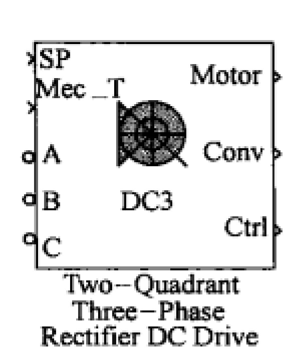


图 8-1　两象限三相整流器

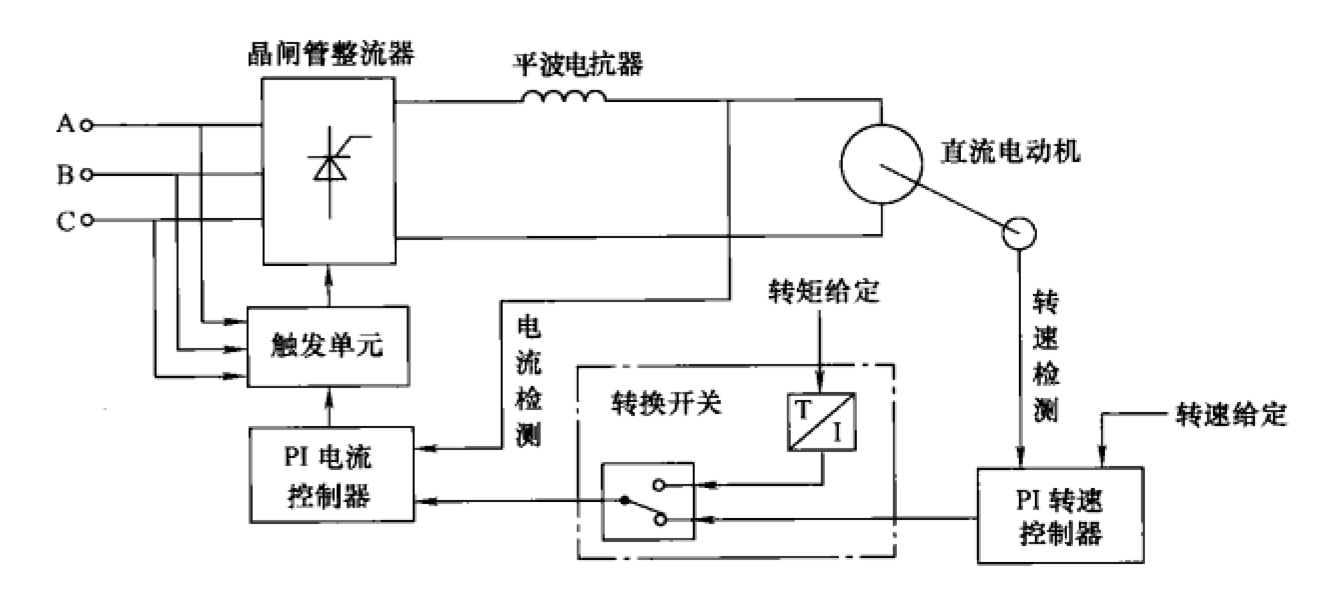


图 8-2　晶闸管三相整流直流调速系统原理图

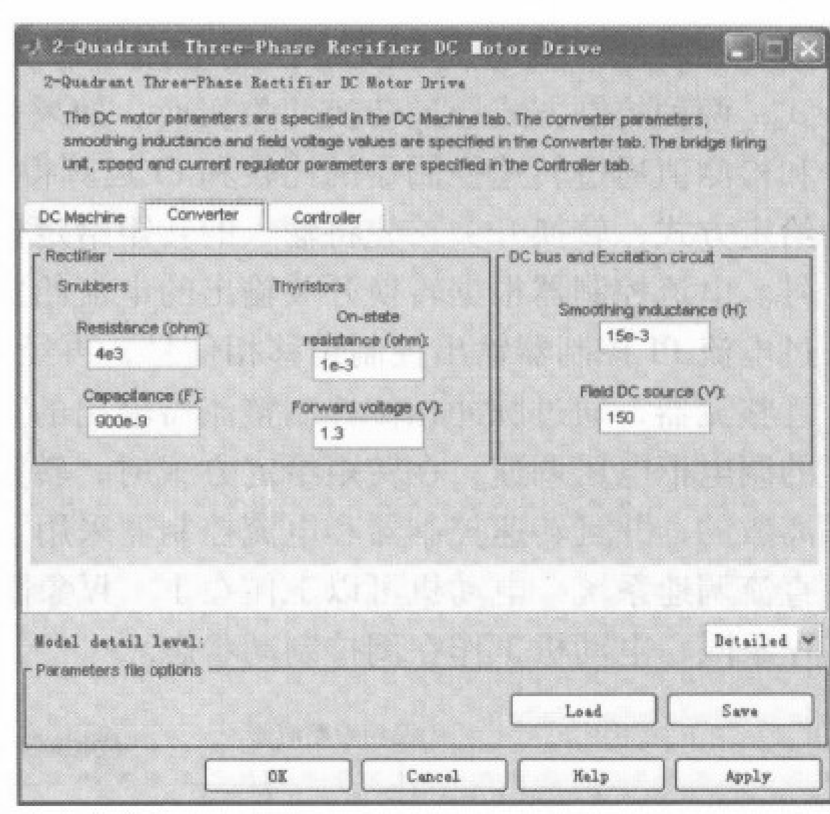
8.1.1　模块参数

模块 Two-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive 有 5 个输入端（见图 8-1），其中 SP 端输入是转速或转矩的给定值，转速可以是阶跃函数，也可以是有加减速斜率限制的斜坡函数。Mec-T 端用于输入机械负载转矩，电动机加速度将取决于电磁转矩和负载转矩之和，如果负载转矩和电动机转速方向相反，电动机工作于电动状态。ABC 三端用于接入三相电源，电源电压需与电动机额定电压相对应。

模块有三个矢量输出端 Motor、Conv. 和 Ctrl，其中 Motor 端的输出包含了电枢电压（armature voltage）和直流电动机模块“m”端的 4 个参数：转速、电枢电流、励磁电流和电磁转矩，并且电动机转速单位已经由 rad/s 转换为 r/min。Conv. 端输出三相整流器的参数，包括整流器输出电压，整流桥的电压和电流可以用多路测量仪模块观测。Ctrl 端用于输出系统控制器参数，包括电流给定值、电流控制器计算得到的控制角、转速或转矩给定值，以及给定值和实际值的偏差。

双击模块弹出模块参数设置的对话框，对话框有 3 页，图 8-3 为电动机和整流器参数页，电动机页的参数（见图 8-3a）与直流电动机模型的参数相同（参见 4.2 节）。整流器参

a)



b)

图 8-3 模块对话框

a）电动机参数页 b）整流器参数页

数页（见图 8-3b）包括了三相晶闸管整流器的参数、平波电抗器（Smoothing Inductance）的电感量和励磁电源电压（Field DC Source）。模型中整流器有 Datailed 和 Average 两种，Datailed 模型的整流器采用多功能桥模块（Universal Bridge block）。Average 模型整流器的交流侧由两个受控交流电流源组成，直流侧由一个受控电压源组成，其中交流侧受控电流源电流模型为

$$I_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \sin(2\pi ft + \alpha + \alpha_0)$$

$$I_b = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \sin\left(2\pi ft + \alpha + \alpha_0 + \frac{2\pi}{3}\right)$$

式中，α 为整流器控制角；α_0为交流 A 相电源相位角；f 为电源频率；I_d为整流器输出电流平均值。

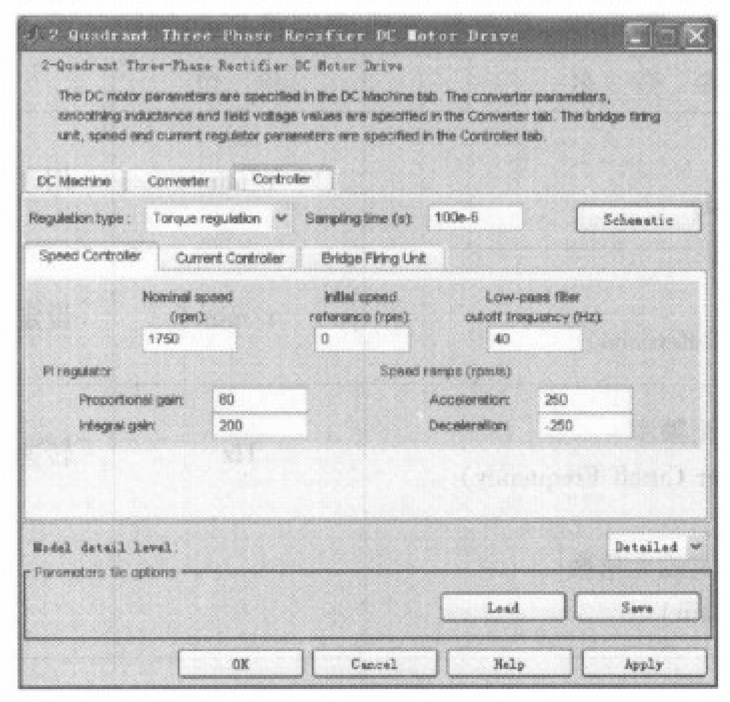
直流侧受控电压源是整流器输出电压：

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{rms} \cos\alpha - 6fLI_d$$

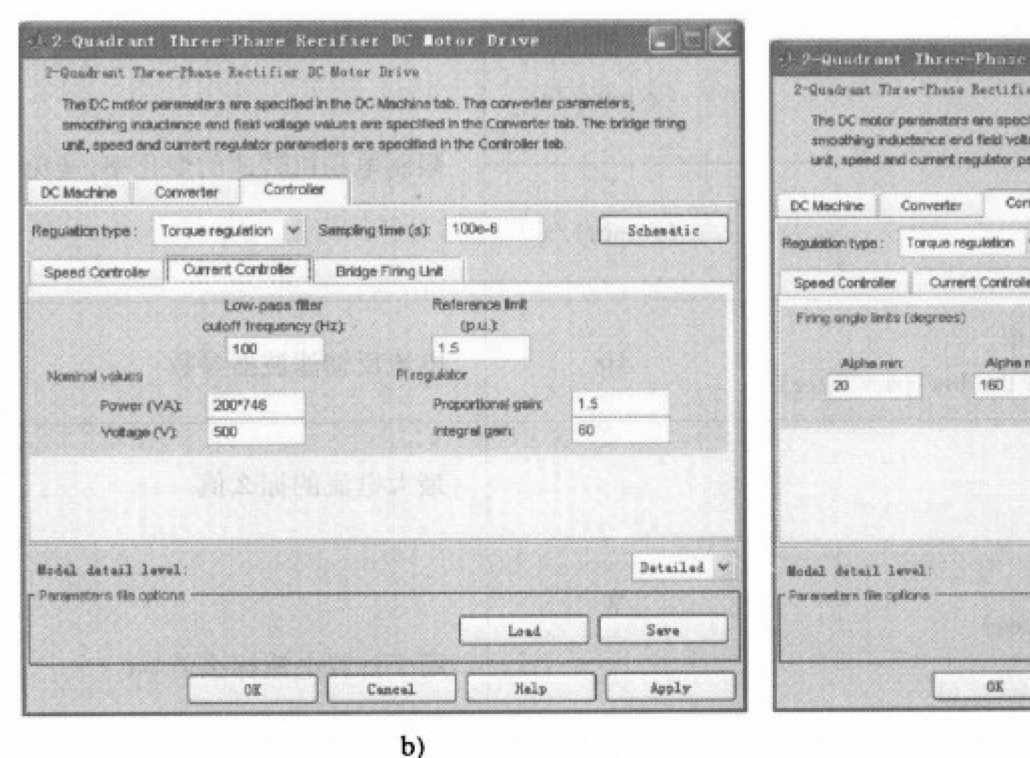
式中，U_{rms}为交流侧线电压有效值。

两种模型中，整流器平均值计算模型比较简单，可以使仿真计算的速度加快，但是整流器输出电压、电流和电动机转矩的脉动情况就不能如实反映。选择平均值模型（Average），需要输入电源线电压、频率、电源电感和 A 相相位等参数，如果选择 Datailed 模型，则不需要设置这 3 项，因此一般仿真都采用 Datailed 模式，可以真实地反映整流器的输出情况。

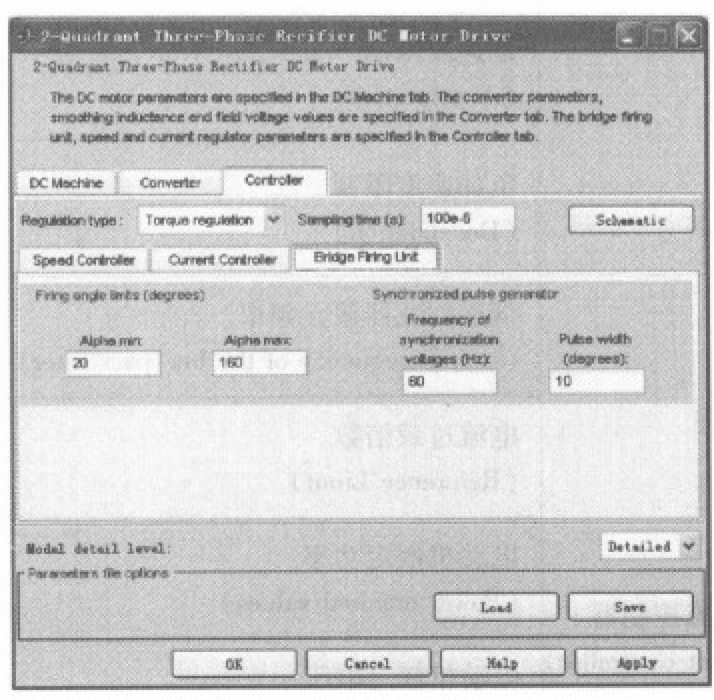
控制器参数（controller）中也包含 3 页，分别为转速控制器、电流控制器和触发器参数页（见图 8-4）。在控制器参数页，首先需要确定系统的控制方式，使用速度调节方式



a)



b)



c)

图 8-4　控制器对话框

a）转速调节器　b）电流调节器　c）触发单元

（speed regulation）还是转矩调节（torque regulation）方式，并且设置采样时间（Sampling Time），转速控制器和电流控制器可以有不同的采样时间，这样可以仿真实时数字系统。如果点击 schematic 按钮，将显示转速控制器和电流控制器的结构。转速控制器、电流控制器和触发器的参数见表 8-3。

8.1.2　两象限三相整流器直流调速系统模型

图 8-5 为两象限三相整流器直流调速系统模块的内部结构，结构与图 8-2 相对应，其中直流电动机模块和晶闸管整流器模块直接取自模型库，晶闸管整流器模块使用的是多功能桥模块（Universal Bridge）。触发器模块（Bridge firing unit）、转速控制器模块（Speed controller）、电流控制器模块（Current controller）和转换开关模块（Regulation Switch）由分支电路组成，下面主要介绍这几个模块。

表 8-3　两象限直流调速系统控制器参数

控制器	参 数 名	单 位	备 注
转速控制器 (Speed Controller)	额定转速 (Nominal Speed)	r/min	用于计算速度标么值 pu
	转速初始值 (Initial Speed Reference)	r/min	设定启动仿真时的电动机速度
	低通滤波器截止频率 (Low-Pass Filter Cutoff Frequency)	Hz	转速反馈滤波器参数
	转速调节器比例放大倍数 (Proportional Gain)		
	转速调节器积分系数 (Integral Gain)		
	加速度限制 (Acceleration)	(r/min)/s	限制电动机转速的变化率,避免过电流
	负加速度限制 (Deceleration)	(r/min)/s	
电流控制器 (Current Controller)	低通滤波器截止频率 (Cutoff frequency of the low-pass filter)	Hz	电流反馈滤波器参数
	电流过载倍数 (Reference Limit)		最大电流的标么值
	电动机额定功率 (Power nominal values)	W	用于计算电流标么值 pu
	电动机额定电压 (Voltage nominal values)	V	
	电流调节器比例放大倍数 (Proportional Gain)		
	电流调节器积分系数 (Integral Gain)		
整流器触发单元 (Bridge Firing Unit)	最小控制角限制 (Alpha Min)	度(°)	
	最大控制角限制 (Alpha Max)	度(°)	
	触发器同步电压频率 (Frequency of synchronization voltages)	Hz	如果整流器采样平均值模型,则不必设置这项参数
	触发脉冲宽度 (Pulse Width)	度(°)	如果整流器采样平均值模型,则不必设置这项参数

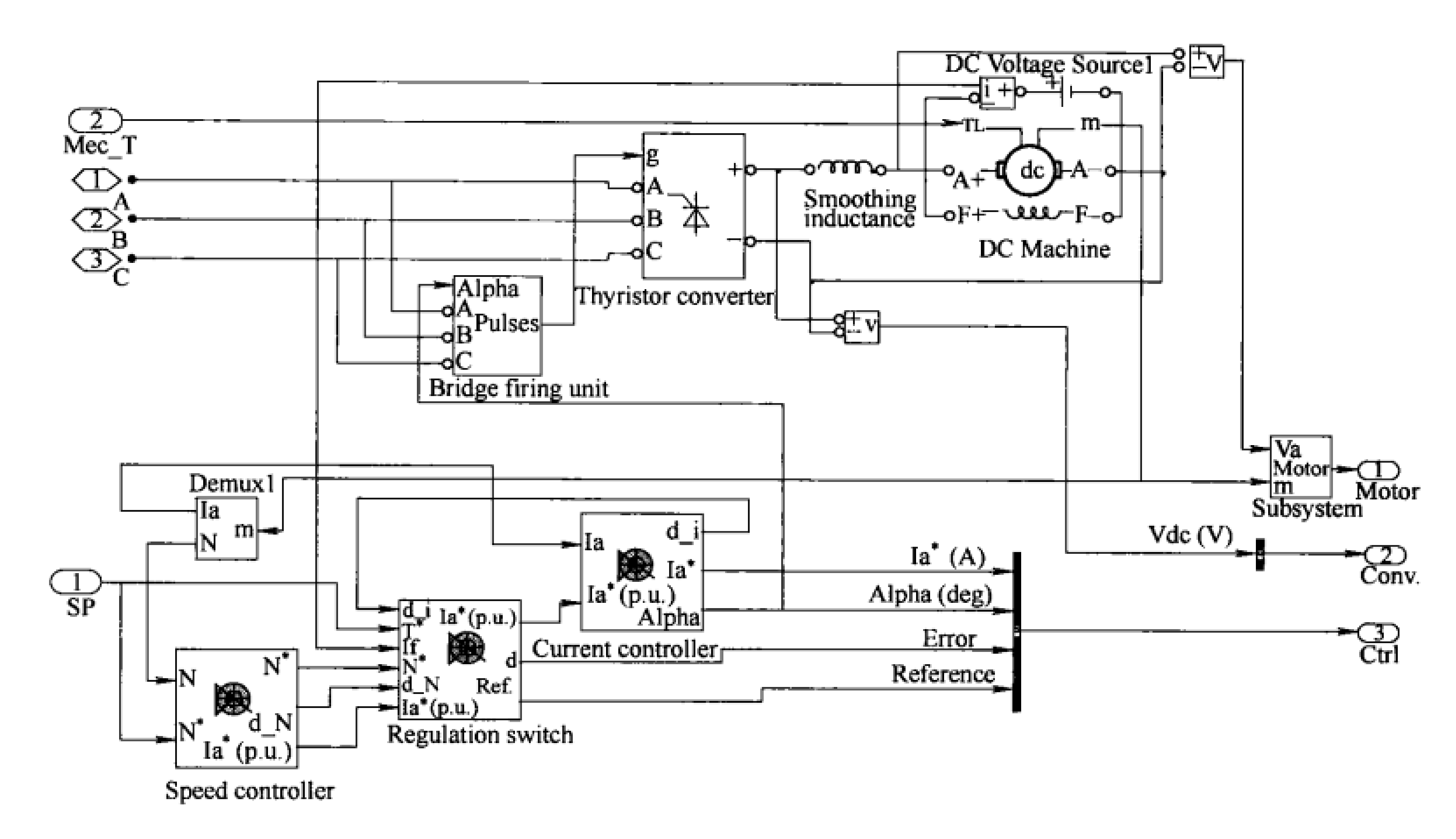


图 8-5　晶闸管三相整流器直流调速系统仿真模型

1. 触发器模块

触发器模块结构如图 8-6 所示，晶闸管触发脉冲的产生采用了离散化的脉冲发生器（Discrete Synchronized 6-Pulse Generator），从 ABC 端口输入三相交流电压经过电压检测模块（Voltmeters）（见图 8-7）得到三相线电压信号，三相线电压信号经过离散的二阶滤波（Discrete 2nd-Order Filter）接到脉冲发生器的同步电压端 AB、BC、CA，脉冲发生器的控制角信号（Alpha）来自电流控制器输出，因为采用了离散化的脉冲发生器，为了使它产生的触发脉冲与整流器触发脉冲的数据类型一致，需要经过数据变换（Convert），相当于数/模转换，变换后的脉冲经过与门（AND）后在 Pulse 端输出。模型中时钟 Clock、常数模块（Constant1）和关系运算模块（Relational Operator）的作用是使触发单元在开始仿真后延时 0.01s 输出脉冲，以避开三相电压在“0”状态起动时波形不规则的一段。

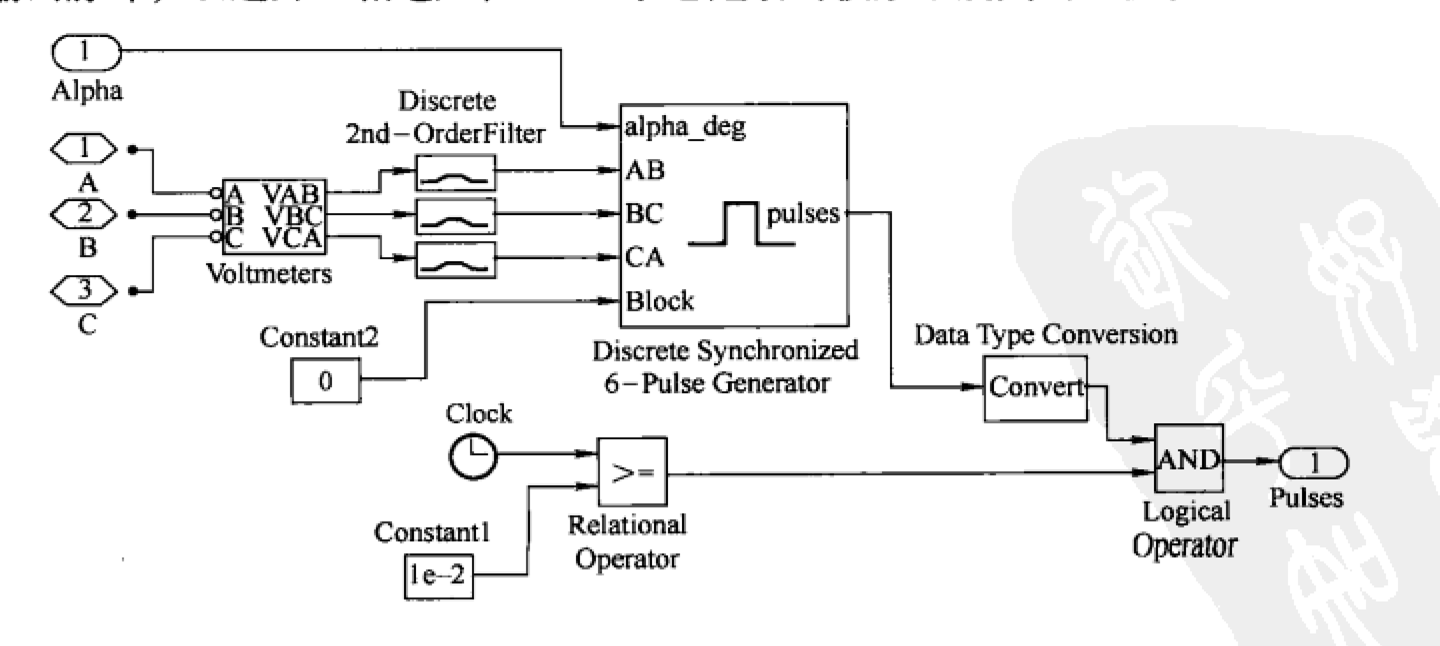


图 8-6　触发器模块结构

2. 转速控制器模块

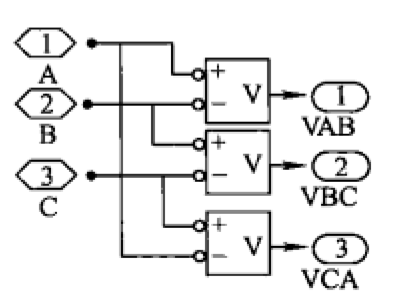


图 8-7 电压检测模块

转速控制器的原理如图 8-8 所示，控制器由采样开关、加减速限制、一阶滤波器和 PI 调节器等环节组成。转速控制器模块的结构如图 8-9 所示，转速给定信号 N * 和反馈信号 N 都经过零阶保持器（Zero-Order Hold），即按照对话框设置的采样时间采样，转速给定 N* 还经过了初始值模块 IC，使转速可以从对话框设置的值开始，并由 speed ramp 模块限制变化加速度，转速反馈信号 N 则经过了低通滤波器（Low-pass filter），低通滤波器为一个离散的传递函数（见图 8-10）。放大器模块（2pu、Proportional gain、Integral gain）和离散积分模块（Discrete-Time Integrator）组成离散的 PI 调节器，其中放大器 2pu 用于调节转速偏差值，Proportional gain 模块设置比例放大倍数，Integral gain 模块设置积分系数，Discrete-Time Integrator 模块进行离散积分。PI 调节器输出有限幅环节（Ctrl sat），转速调节器的输出是电枢电流的给定（标幺值），如果是转矩控制方式，则转速控制不起作用。图 8-11 是采样前后的转速反馈信号，图 8-12 是离散的转速调节器输入和未经限幅的输出，两个信号主要区别在幅值不同。

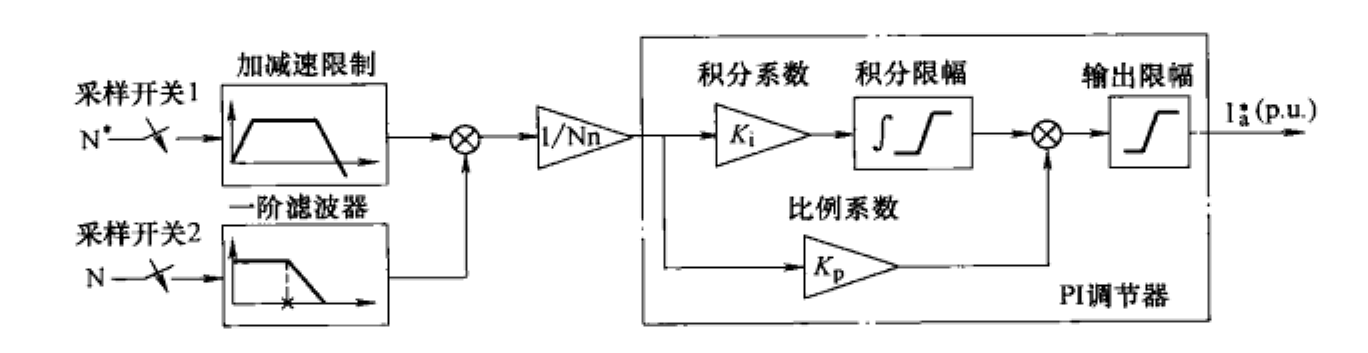


图 8-8 速度控制器原理图

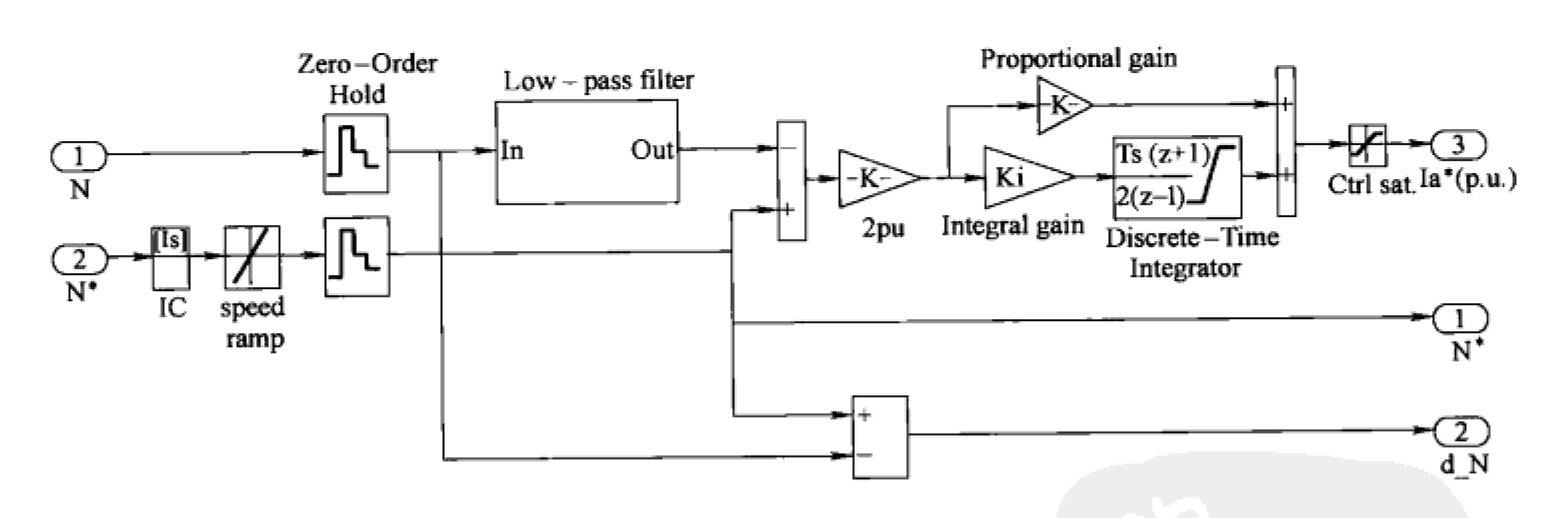


图 8-9 转速控制器模块结构

3. 电流控制器模块

电流控制器模块结构如图 8-13 所示，端口 Ia 的电流反馈信号经过零阶采样（Zero-Order Hold1）、低通滤波器（Low-pass filter）和端口 Ia*（p. u.）的电流给定信号一起进入电流调节器模块（Current controller DISCRETE），其中电流调节器模块结构如图8-14 所示，与转速调节器一样采用输出限幅的离散

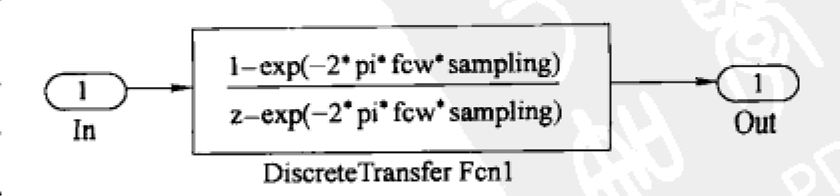
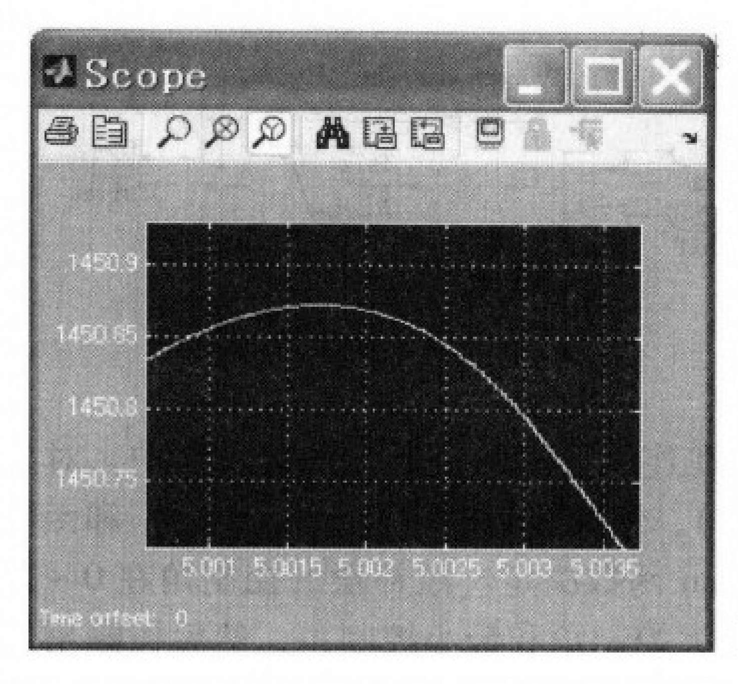
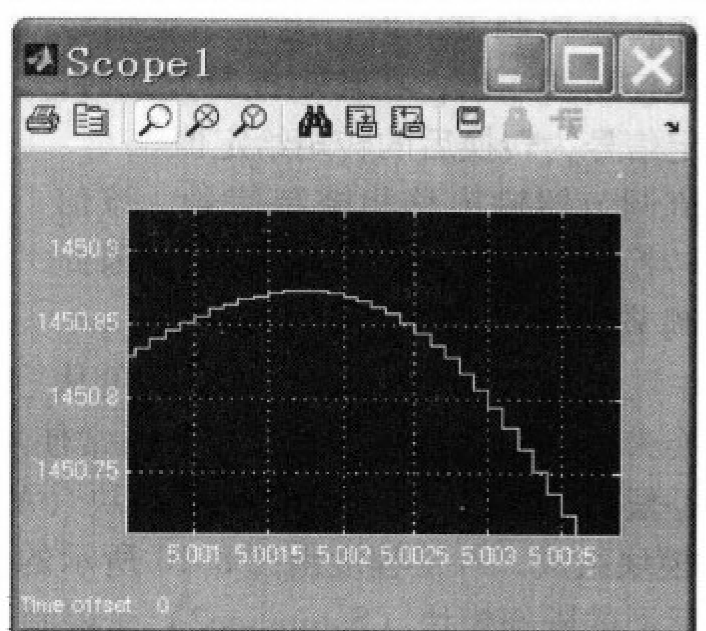


图 8-10 低通滤波器



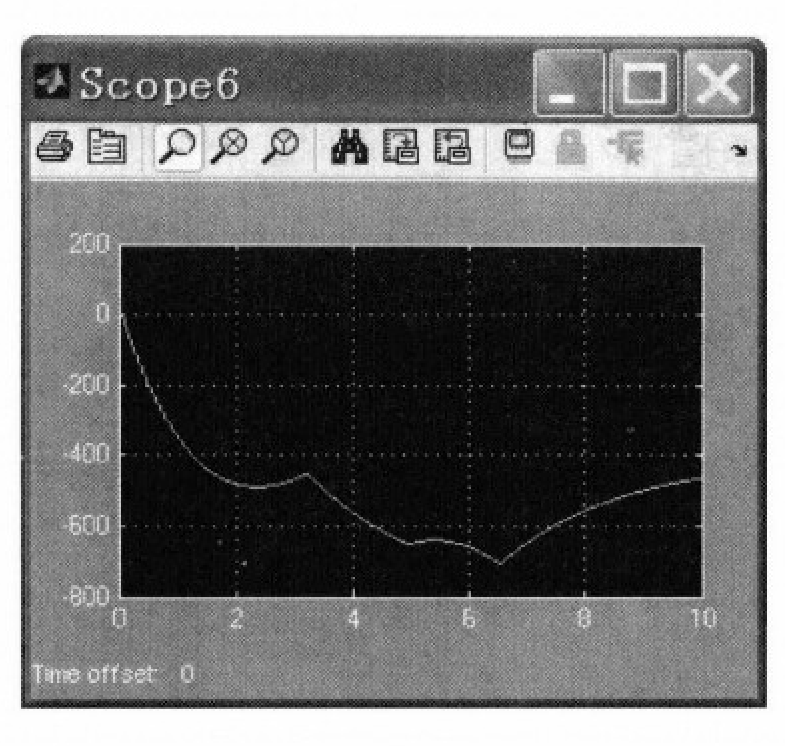
a)



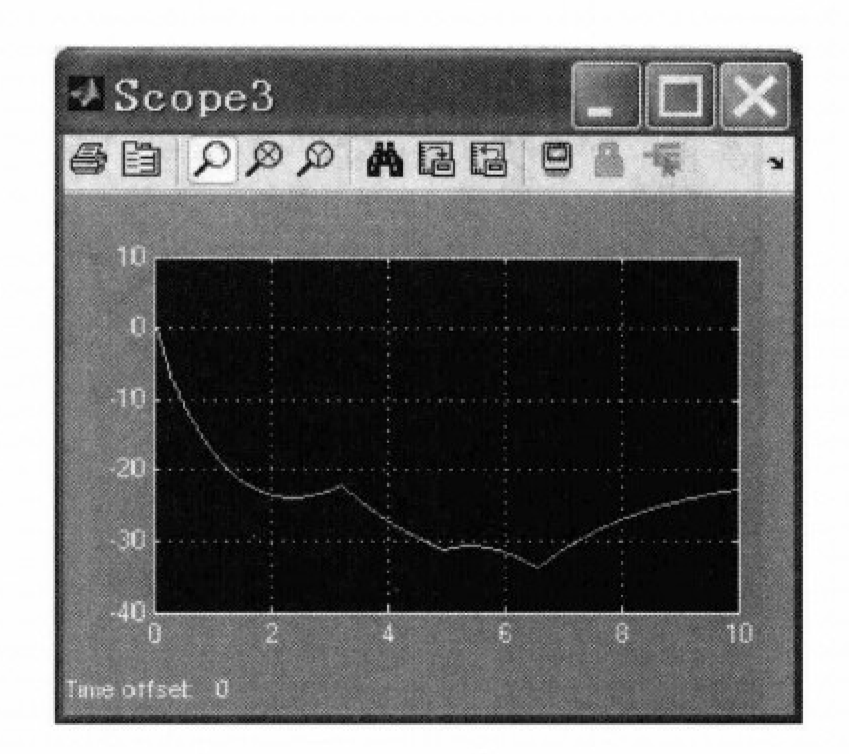
b)

图 8-11　采样信号波形

a）采样前　b）采样后



a)



b)

图 8-12　转速调节器信号波形

a）转速偏差信号　b）离散调节器输出信号

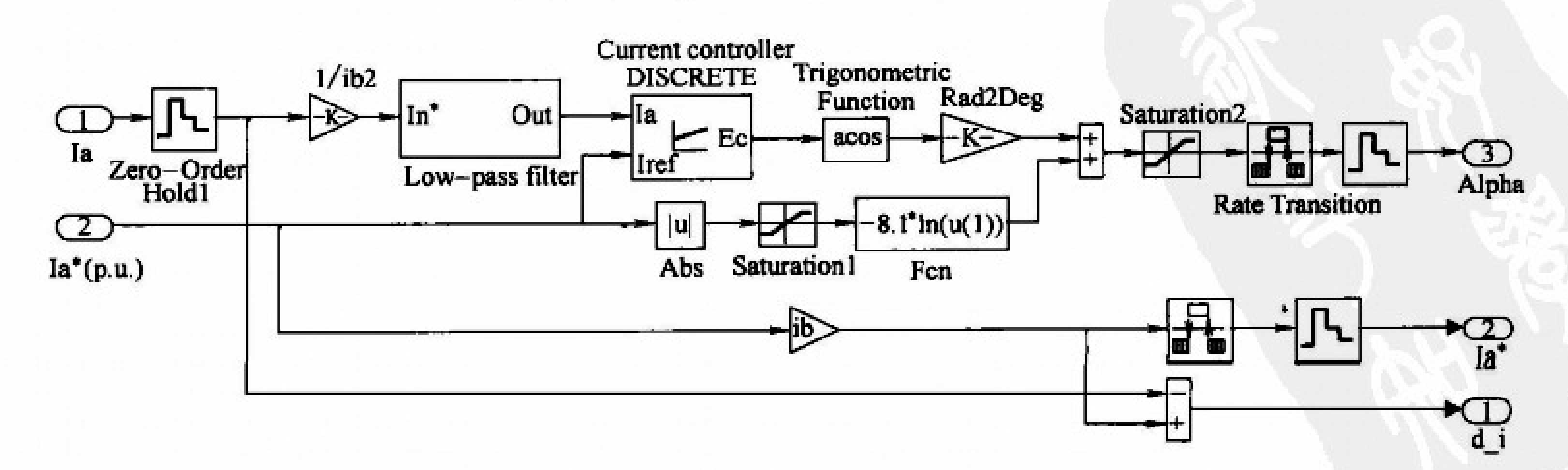


图 8-13　电流控制器模块结构

积分。在转速控制方式时，电流给定信号来自转速控制器输出，在转矩控制方式时，电流给定信号为转换后的转矩给定值。

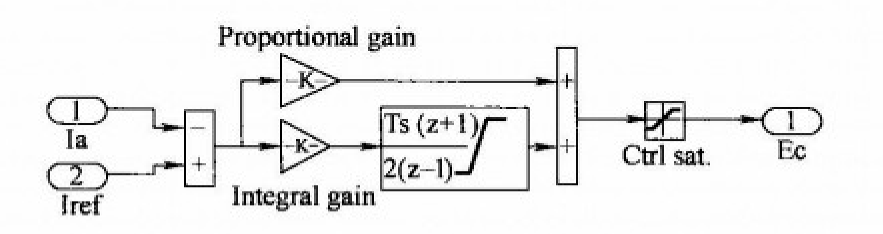
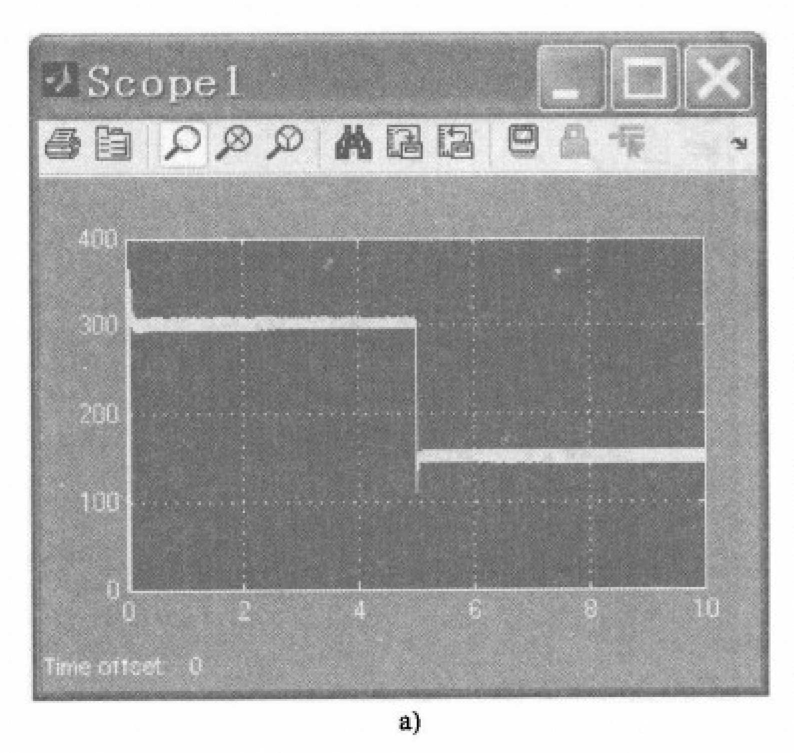
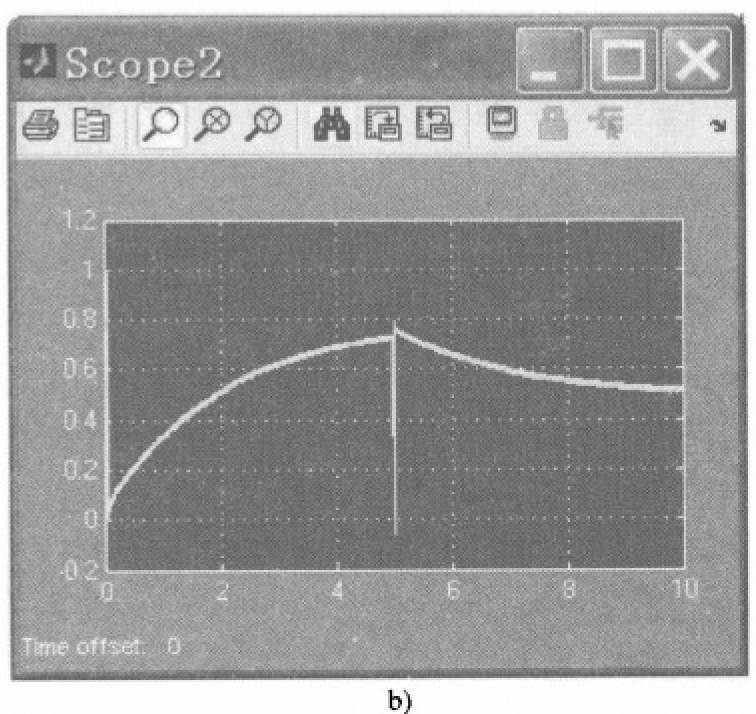


图 8-14　PI 调节器结构

电流调节器输出移相控制信号，该信号需要转换成触发器需要的控制角，因此在电流调节器后连接了反三角函数（arccos），并且由放大器 Rad2Deg 将控制角从弧度变换为度（°）。因为反余弦变换通常使用在连续导通的线性化控制系统中，对离散系统需要补偿其非线性，补偿由绝对值模块（Abs）、饱和限制模块（Saturation1）和函数模块（Fcn）模块组成，补偿程度由图 8-10 所示的 Fcn 函数决定。经补偿的控制角在 0 ~ 180°之间，由后面的限幅模块（Saturation2）来限制最大控制角和最小控制角，然后控制角信号经过数据速率调整（Rate Transition）和零阶保持器后输出，输出端 Ia＊和输出端 di 分别给出电枢电流给定和偏差信号。图 8-15a、图 8-15b 为采样后的电流信号和电流离散调节器的输出信号。



a)



b)

图 8-15　电流调节器信号波形
a）电流采样信号　b）电流离散调节器输出信号

4. 转换开关模块

转换开关模块（Bridge firing unit）结构如图 8-16 所示，转换开关模块的作用主要是选择电流控制器的电流给定值 Ia＊，在图 8-4 对话框中如果选择转矩控制方式，则转换开关模块根据给定转矩 $T*$ 和电动机的励磁电流 I_f 计算电动机电枢电流的给定值：

$$I_a^* = \frac{T^*}{L_{af} I_f}$$

式中，L_{af}为磁场和电枢绕组间互感。

如果选择是转速控制方式，则电流控制器输入的电流给定值 Ia＊就是转速控制器的输

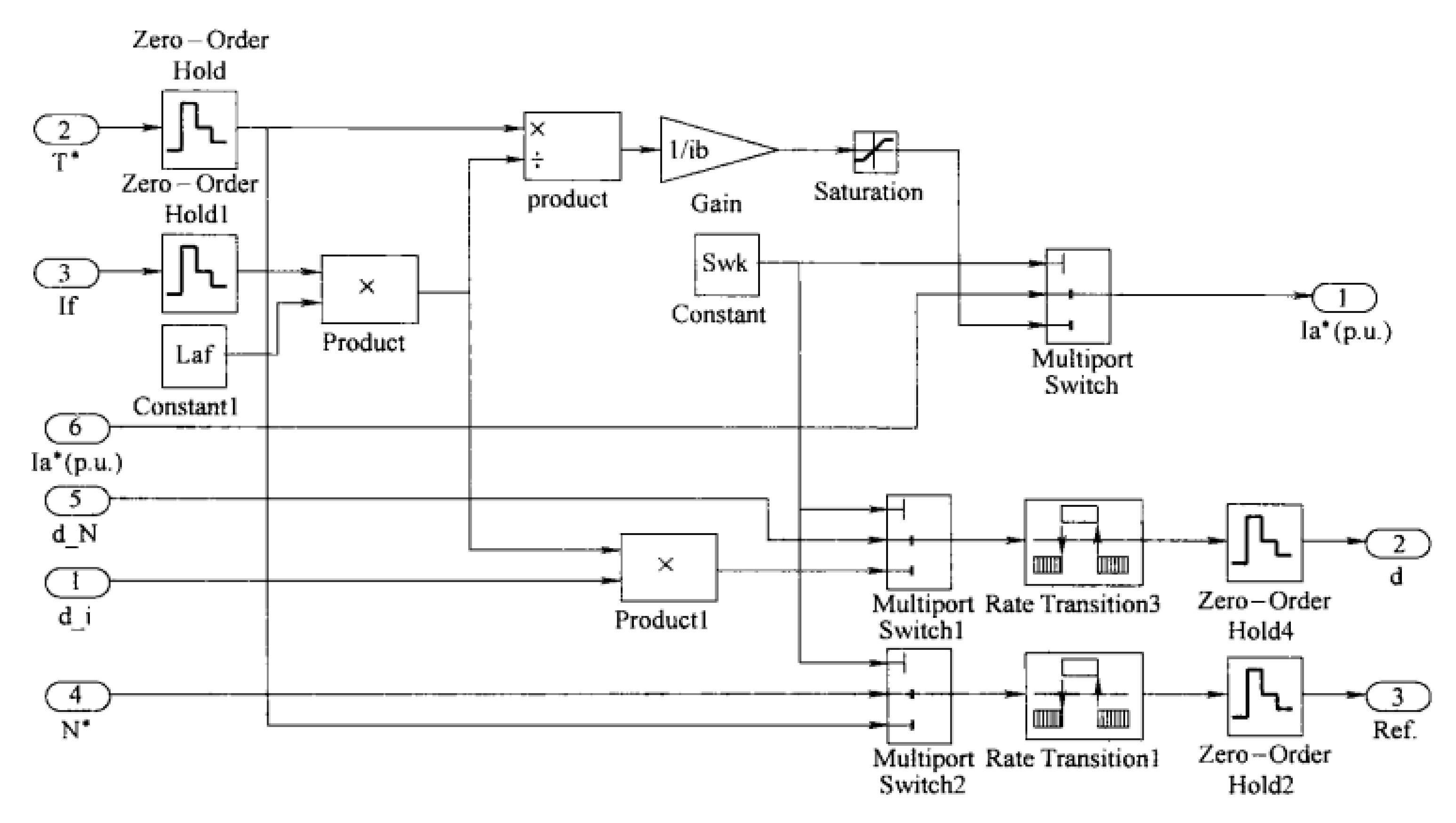


图 8-16　转换开关模块

出，两种方式的变换通过模块中的多路选择开关（Multiport Switch）进行（见图 8-16），图中另两个多路选择开关用于输出参数的转换。

8.1.3　模块应用举例 DC3

观察一种转矩控制晶闸管直流调速系统工作情况的仿真模型如图 8-17 所示，模型由三相电源、直流调速系统模块（Two-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive）、转矩给定（Torque reference）、负载（Linear load torque）等模块组成，并通过选择器（Selector）和示波器（Scope）观察晶闸管控制角或电动机的参数，选择器（Selector）的结构如图（图8-18 所示）。通过多路观测器和示波器（Scope1）可观察晶闸管的电压、电流等波形。模型中电动机的负载由模块（Linear load torque）得到（见图 8-19），负载转矩与电动机转速关系为：$T_L=0.47n$（N·m）。直流电动机和整流器参数如图 8-3 所示，转速控制器、电流控制器和转换开关参数如图 8-4 所示。三相电源 460V，60Hz，电源电阻 0.01Ω，电感 0.1mH。该系统的仿真步长为 20 μs，电流调节器的采样时间为 100μs。

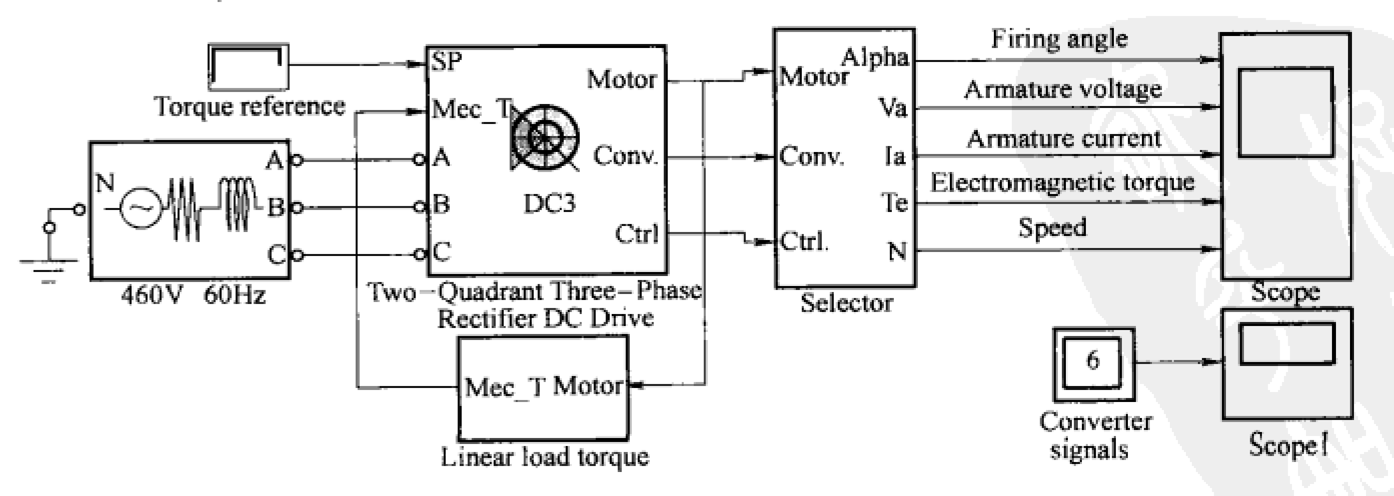


图 8-17　转矩控制晶闸管直流调速系统

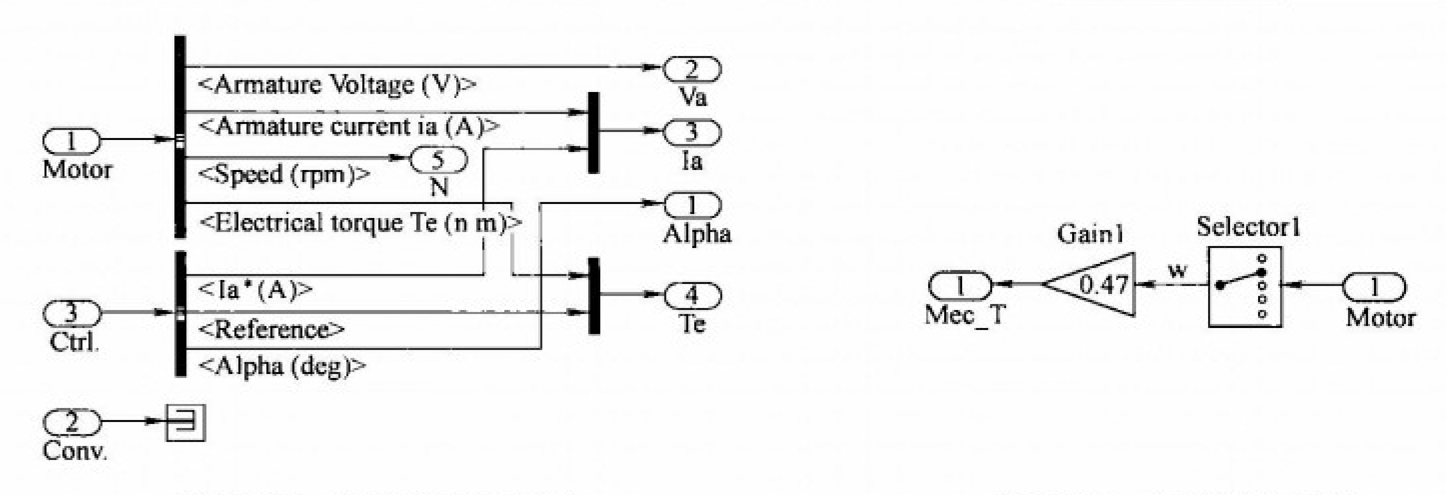


图 8-18　选择器模块结构　　　　图 8-19　负载模块结构

设定转矩给定在 $t=0$、0.05、5s 时，分别为 0、800、400N·m，系统仿真的波形如图 8-20 所示，在 $t=0$ 时给定转矩为 0，电动机没有转动，转速为 0。在 $t=0.05$s 时转矩给定阶跃到 800N·m，在电流调节器作用下，电枢电流很快跃升到 305A，使转速上升，并且在 0.5s 时达到 1450r/min。因为直流回路串联了 15mH 平波电抗器，电枢电流的波动很小，并且超调很小。在 $t=5$s 时转矩给定下降为 400N·m，经过电流调节器的调节，电枢电流下降为 155A，使电动机转矩下降，电动机转速减小，到 16s 时转速下降为 850r/min，仿真很好地反映了系统在控制器设计参数下，转速随转矩给定变化时的调节过程。

图 8-20　仿真波形

a）转速　b）电枢电流　c）转矩　d）控制角（°）　e）整流器输出电压 u_d　f）u_d 局部

8.2　四象限晶闸管控制直流调速系统模块

8.2.1　离散的 $\alpha=\beta$ 有环流控制可逆系统

四象限晶闸管控制直流调速系统模块（Four-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive）（见图 8-21）用于仿真晶闸管三相整流器可逆调速系统，系统原理如图 8-22 所示，系统的仿真模型如图 8-23 所示。系统主电路由两组反并联的三相全桥晶闸管整流器、4 个限制环流电抗器 $L1 \sim L4$、平波电抗器 L 和直流电动机组成。系统采用 $\alpha=\beta$ 有环流控制，控制电路包括转速控制器、电流控制器、触发单元和转换开关等，通过转换开关有转矩控制和转速控制两种控制方式，在系统采用转矩给定的控制方式时，转速控制器则不起作用。两组整流器可以选择使用平均值模型，以加快仿真速度。

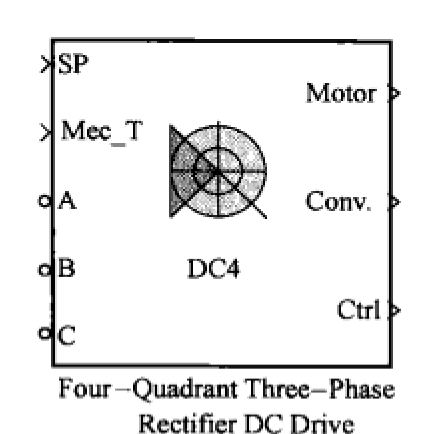


图 8-21　可逆晶闸管直流调速系统图标

四象限晶闸管控制直流调速系统模块的输入和输出参数和两象限晶闸管控制直流调速系统模块的输入和输出参数基本相同，参数设置方法也相同（参见图 8-3 和图 8-4），模型中（见图 8-20）转速控制器、转换开关和触发单元的结构也相同，因此主要介绍两个模型中不同的地方。

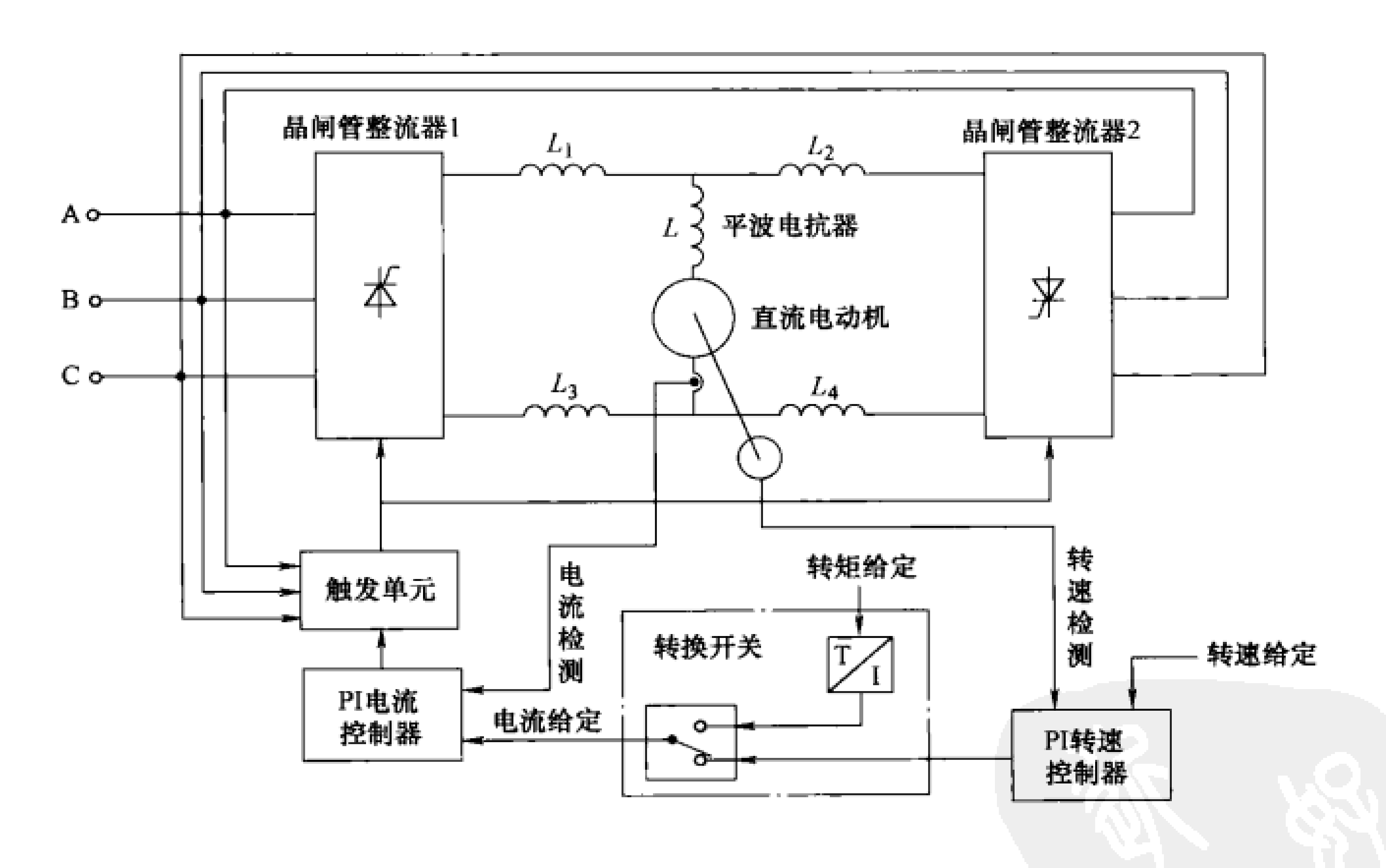


图 8-22　可逆晶闸管直流调速系统模块原理图

1. 电流控制器（Current controller）

$\alpha=\beta$ 有环流控制的直流可逆系统，两组整流器的控制角不同，并保持 $\alpha_1+\alpha_2=180°$ 的关系，因此四象限晶闸管控制直流调速系统的电流控制器有两路控制角输出 Alpha1 和 Alpha2（见图 8-24），并且 Alpha2 端控制角 $\alpha_2=180°-\alpha_1$，其他模块作用与二象限晶闸管控制直流调速系统的电流控制器相同。

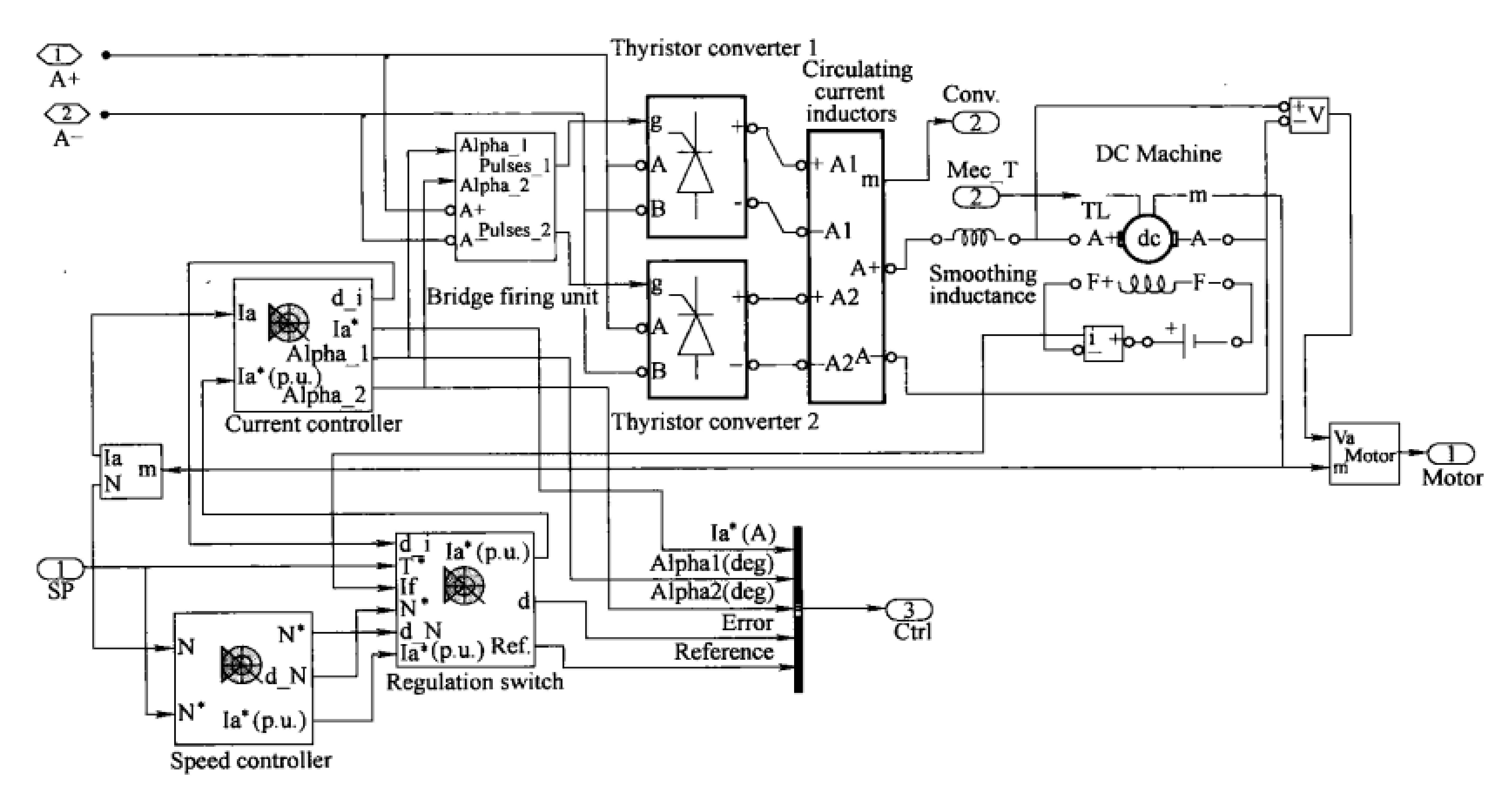


图 8-23　Four-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive 模块仿真模型

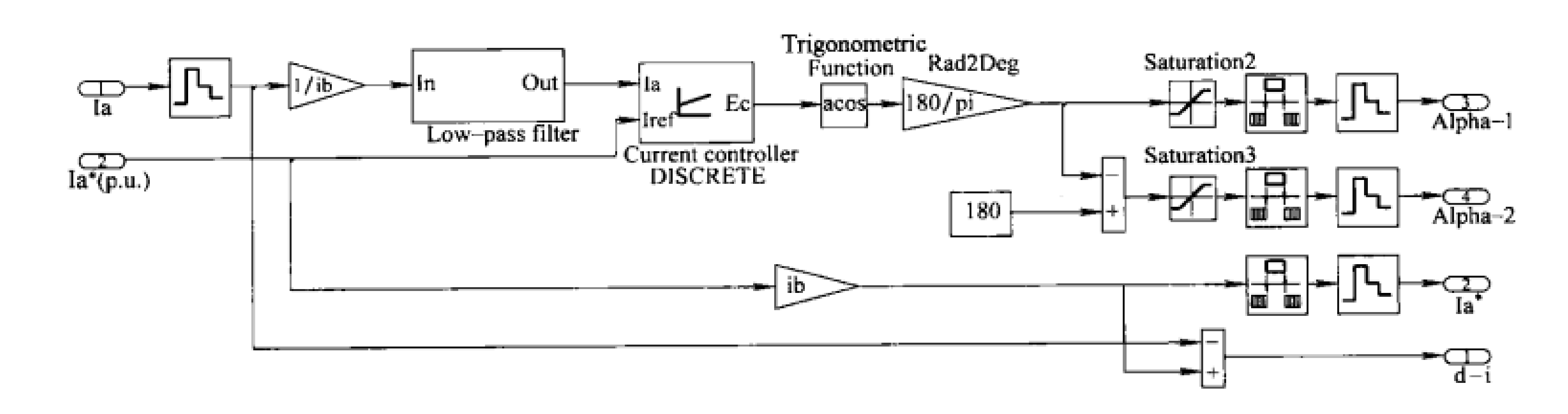


图 8-24　电流控制器模块

2. 环流电抗器模块（Circulating current Inductors）

$\alpha=\beta$ 控制两组反并联整流器间没有直流环流，但是有脉动环流，为了限制脉动环流的大小，必须在直流回路中设置限制环流电抗器，因此图 8-23 模型中 Circulating current Inductors 模块是用于在两组整流器输出端连接环流电抗器（见图 8-25），对于三相桥反并联系统，在每个导通时刻有两条环流通路，因此需要 4 个环流电抗器 Ls1 ~4，并且模块中还有观察整流器输出电压和电流的输出端 m。

3. 模块应用举例 DC4

使用四象限晶闸管控制直流调速系统模块的可逆调速系统模型如图 8-26 所示，电动机模型和整流器、调节器参数设置和图 8-1 相同，并设环流电抗器为 5mH，模型也采用转矩给定方式，在 0、0.2、4、8s 时分别设定转矩给定为 0、600、0、－300N·m。系统的仿真结果如图 8-27 所示，图 8-27a ~ c 依次为转速、电枢电流和电磁转矩响应曲线，图 8-27d ~ j 分别为整流器 1 和整流器 2 的控制角，以及整流器 1 和整流器 2 输出的电压和电流波形，图 8-27k 为电枢电流波形。因为在 0.2s 时给定转矩 600N·m，电动机电枢电流上升到 180 A，

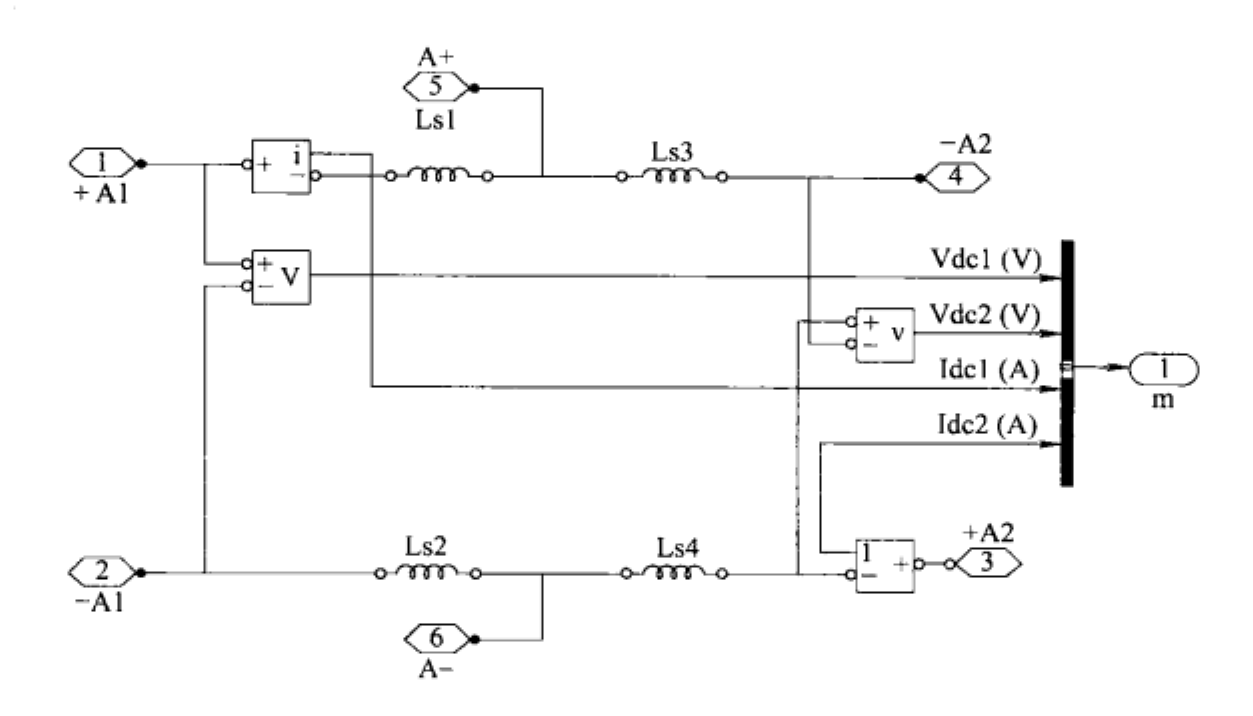


图 8-25　环流电抗器模块

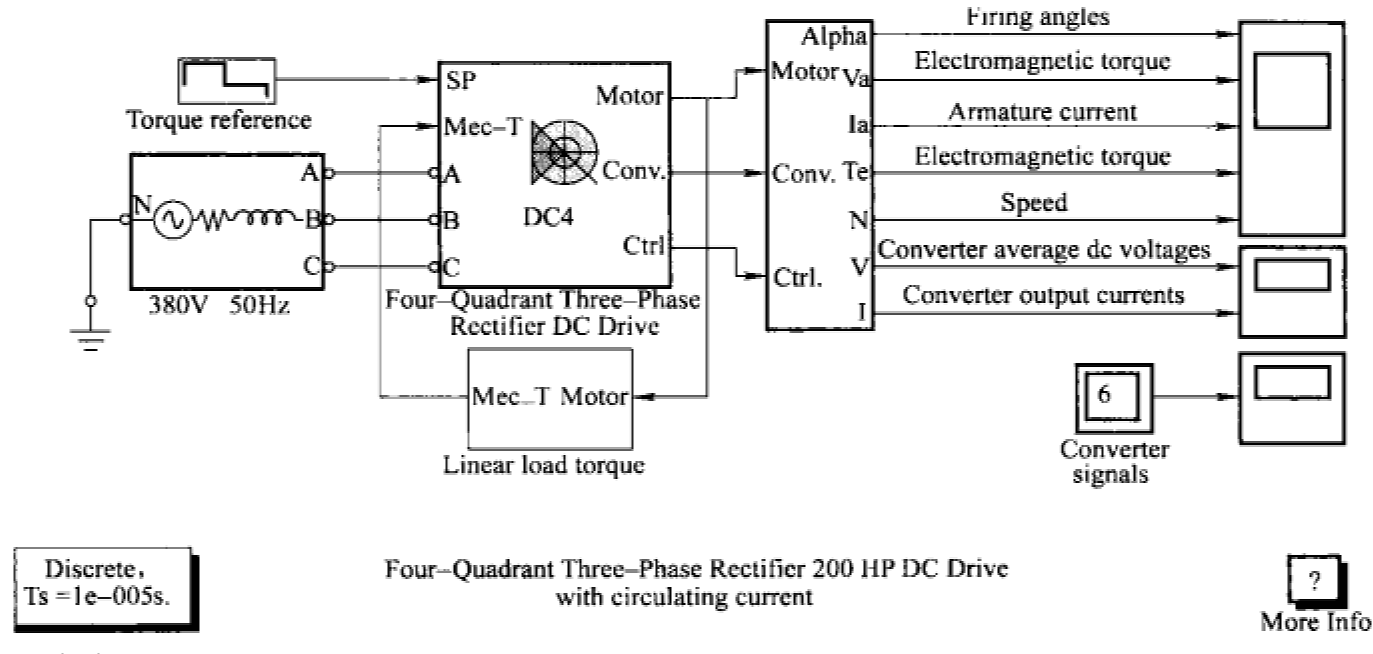


图 8-26　晶闸管直流可逆调速系统模型

该电流由整流器 1 提供，整流器 1 输出的电流包含电枢电流和脉动环流两部分，而整流器 2 的电流仅是脉动环流部分，电动机转速从 0 逐步上升，在 $t=4s$ 时 达到 560r/min，同时因为转矩给定突变为 0，整流器 1 的控制角开始增加到 90°，整流器 1 和整流器 2 的电流主要是环流，两者电流基本相等，电枢电流为 0，电磁转矩也下降为 0，电动机开始减速直到 0。在 $t=8s$ 时给定转矩跃减为 $-300N \cdot m$，整流器 2 控制角小于 90°，整流器 2 进入整流状态（整流器 1 进入待逆变状态），电动机转速开始反向上升，在 $t=12s$ 时达到 -290r/min。在整个过程中，因为电枢串联了平波电抗器，电枢电流的波动很小。在电动机正转时，整流器 1 输出电流幅值约为 260A，整流器 2 输出电流仅为环流，其幅值约为 76A。在电动机反转时，整流器 2 输出电流幅值约为 150A，整流器 1 输出电流仅为环流，其幅值约为 60A。

8.2.2　离散的无环流控制可逆系统

无环流控制直流可逆调速系统的模块（Four-Quadrant Three-Phase Rectifier DC Drive with

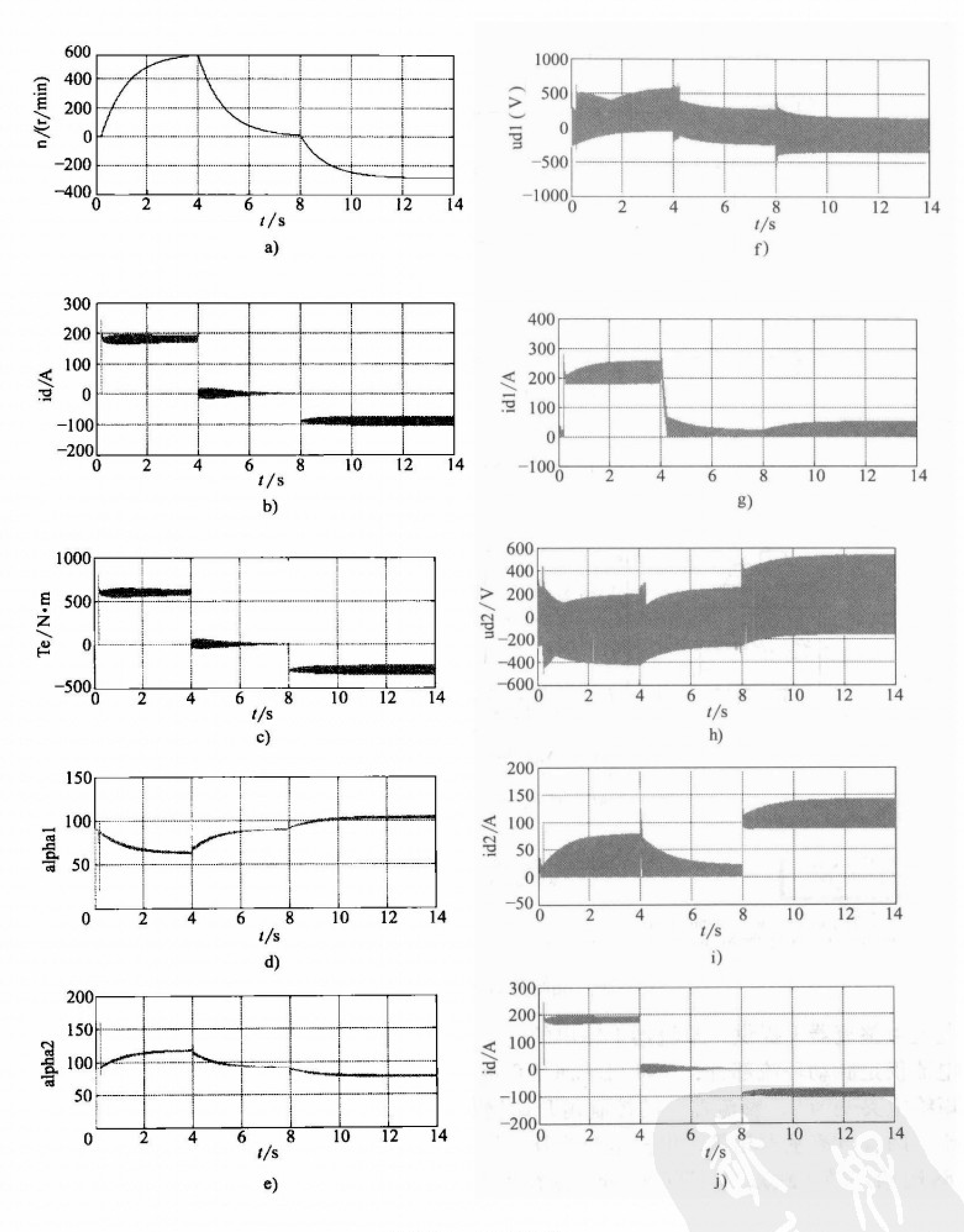


图 8-27 输出波形

a）转速 b）电枢电流 c）转矩 d）整流器 1 控制角 e）整流器 2 控制角 f）整流器 1 输出电压 g）整流器 1 输出电流 h）整流器 2 输出电压 i）整流器 2 输出电流 j）电枢电流

no circulating current）结构（见图 8-28）与有环流系统模块（见图 8-23）基本相同，不同在于，无环流控制可逆调速系统不需要限制环流电抗器（Circulating current Inductors），而增加了逻辑控制器模块（Bridge driver）。逻辑控制器模块 Bridge driver 结构如图 8-29 所示，

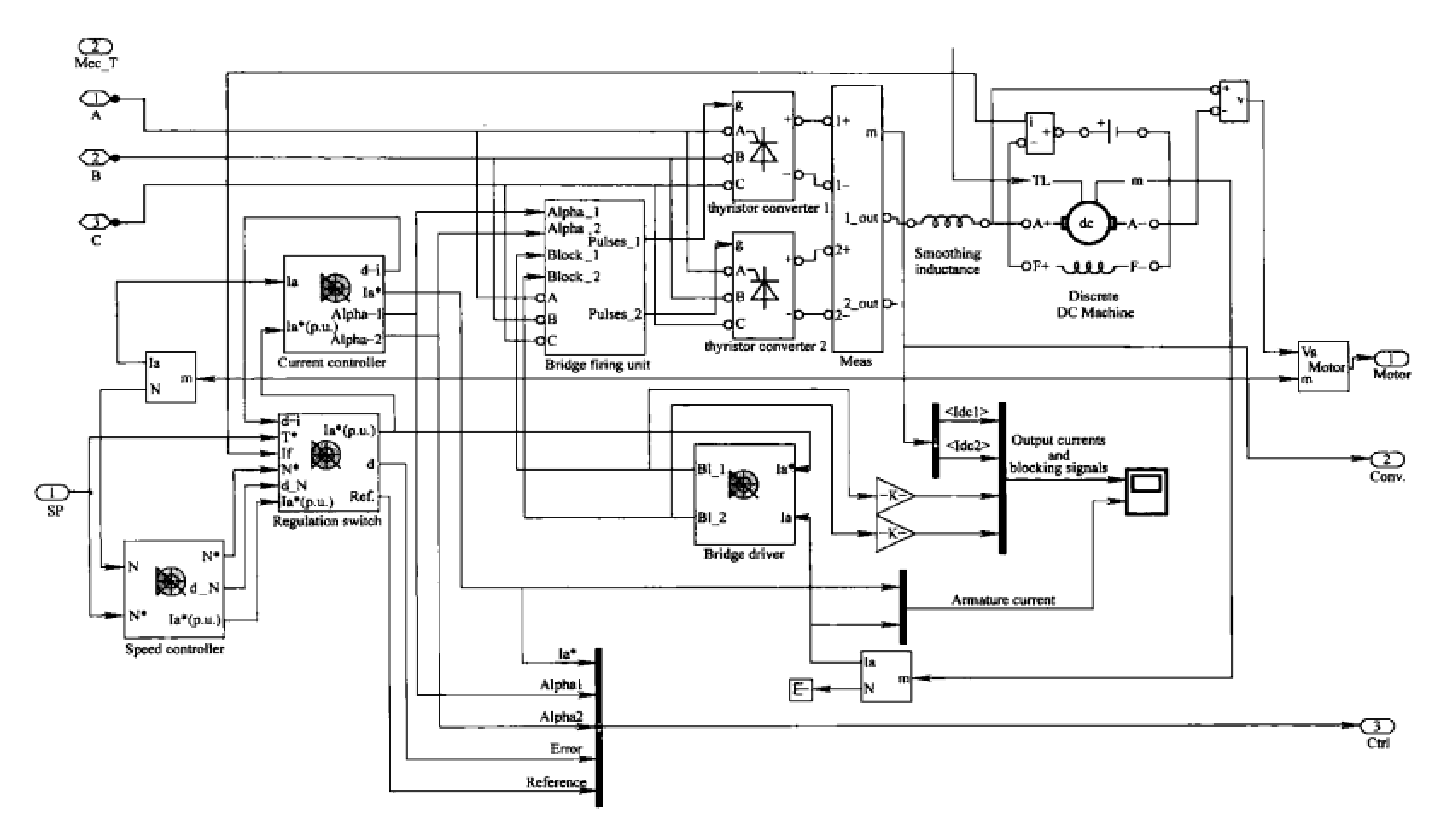


图 8-28　逻辑无环流直流可逆系统模型

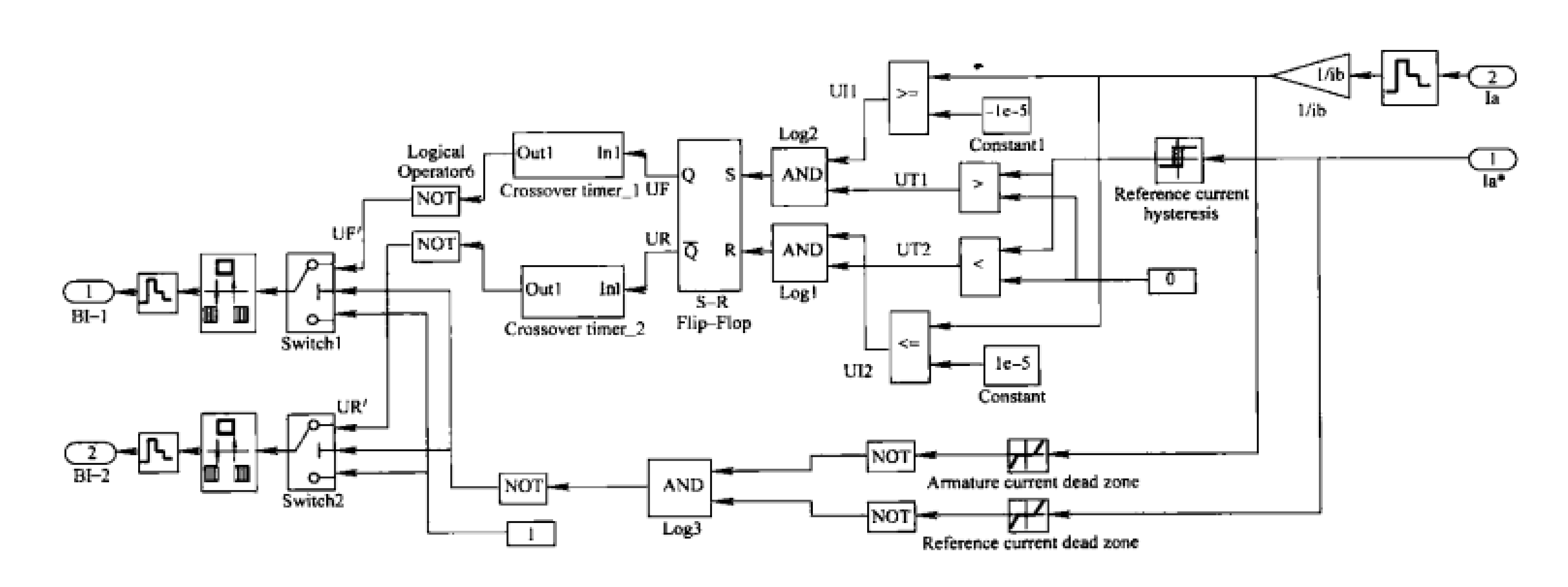


图 8-29　逻辑控制器模块结构

模块的输入是电枢电流的给定值 Ia* 和检测值 Ia，给定值 Ia* 经过滞环控制器（Reference current hysteresis）和比较器判断转矩极性，得到两个转矩极性信号 UT1 和 UT2，检测值 Ia 经过采样开关和比较器得到零电流信号 UI1 和 UI2，常数模块（Constant 和 Constant1）用于设定零电流的检测误差。由与门（Logical Operator）和触发器（S-R Flip-Flop）组成逻辑判断电路，得到逻辑切换信号 UF 和 UR。换向定时器（Crossover timer_1 和 2）用于设定开放延时，换向定时器（Crossover timer）结构如图 8-30 所示，图中，数字时钟（Digital Clock）与延迟一个采样周期的时间比较（Unit Delay2），如果延时已经超过常数模块 Constant3 设定的时间，则允许有切换信号 UF

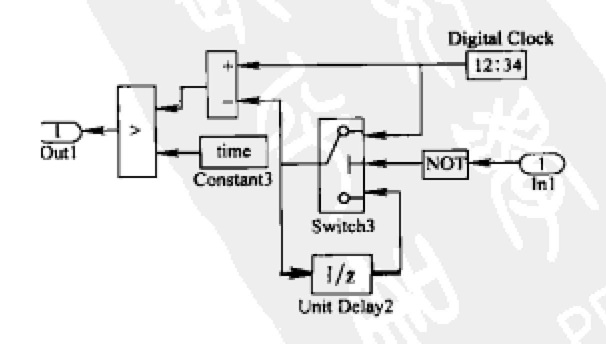


图 8-30　换向定时器结构

或 UR 通过，整流器 1 或整流器 2 有触发脉冲开始工作。逻辑控制电路下方的死区模块（Armature current dead zone）、逻辑运算模块和开关（Switch）组成连锁保护环节，当逻辑切换信号 UF′和 UR′都为“1”时，则同时封锁两组晶闸管整流器的触发脉冲，使两组晶闸管整流器都不工作，避免两组晶闸管整流器同时都工作在整流状态而造成短路故障。

以图 8-28 组成的模块取代图 8-26 模型中的 Four-Quadrant Three-Phase Rectifier 模块组成的可逆调速系统模型如图 8-31 所示，模型采用速度给定模式，速度给定模块（Speed reference）的设定值为 $t=0$ 时电动机的初始速度为 1184r/min，在 $t=5$s 时改变为 −600r/min。

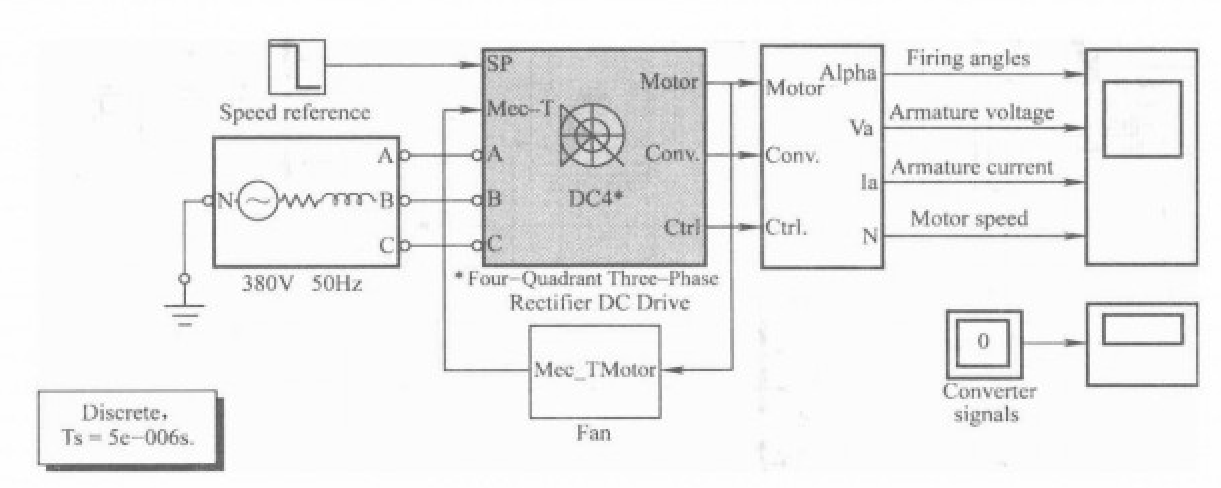


图 8-31　逻辑无环流模块组成的直流调速系统模型

仿真的波形如图 8-32 所示，起动时电动机转速从 0 上升（见图 8-32a），在 0.37s 达到 1184r/min，0.5s 时转速给定改变，电动机转速下降，在 8.5s 时转速下降到 0 并反向，在 10.5s 达到 −600r/min。电枢电流波形如图 8-32b 所示，在转速给定改变时（$t=5$s）电动机正向电流下降，在 5.8s 时电流下降为 0，这段时间是整流器 1 的本桥逆变阶段，接着是反组桥整流器 2 的反向建流和有源逆变阶段，在电动机转速过 0 后（$t=8.5$s）电动机进入反向起动阶段。图 8-32c 和图 8-32d 分别为整流器 1 和整流器 2 的电流波形，从电流波形可见，整流器 1 提供电枢电流 i_d 的正向部分，整流器 2 提供电枢电流 id 的反向部分，比较图 8-27h 和图 8-27j，无环流控制在整流器 1 和整流器 2 之间没有环流。图 8-32e ~ f 分别是逻辑控制器的转矩极性和零电流信号，图 8-32g ~ h 分别是逻辑控制器的输出信号，在输出信号为 0 时整流器工作，在信号为 1 时整流器关断。

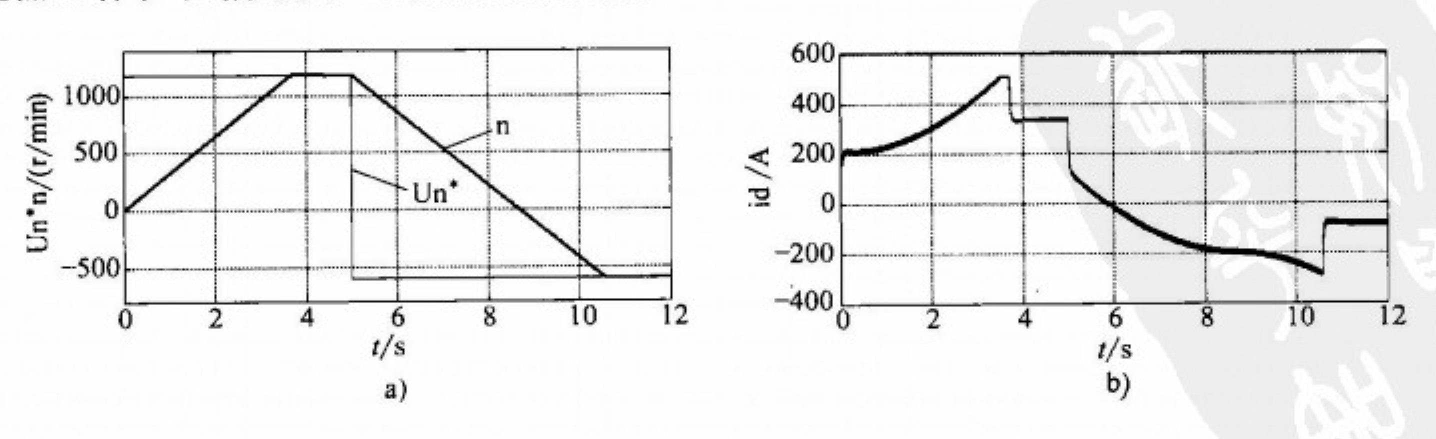


图 8-32　逻辑无环流系统波形

a）转速给定 Un*，转速 n　b）电枢电流

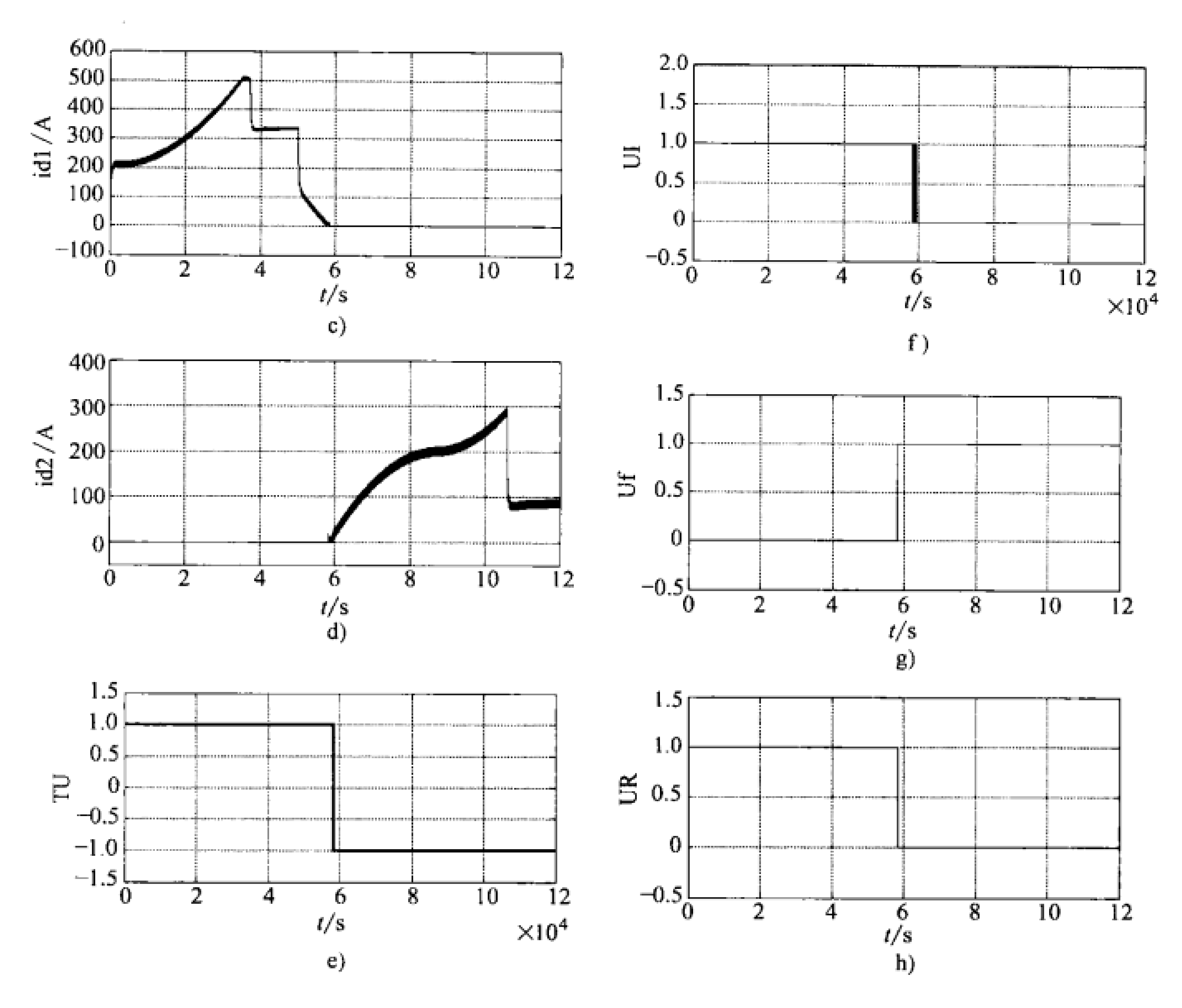


图 8-32　逻辑无环流系统波形（续）

c）整流器 1 电流　d）整流器 2 电流　e）转矩极性信号　f）零电流信号　g）整流器开 1 放信号 UF　h）整流器 2 开放信号 UR

8.3　四象限斩波控制直流调速系统

8.3.1　Four-Quadrant Chopper DC Drive 模块

四象限斩波控制直流电动机系统模块图标如图 8-33 所示，该模块用于仿真 PWM 斩波控制直流电动机的正反向运行。图 8-34 所示是该系统的电气原理图，直流电动机由 4 个 IGBT/Diode 器件组成的桥式电路控制，IGBT1、4 导通，直流电动机通过正向电流，电动机正转；IGBT2、3 导通，电动机有反向电流，电动机反转。系统控制电路由转速控制器、转换开关和电流控制器组成，该系统也有转矩控制和转速控制两种控制方式，两种控制方式通过转换开关切换。如果是转速控制方式，转速给定和检测值通过转速控制器比较和 PI 运算得到电流给定值。如果是转矩给定方式，转换开关根据接受转矩给定信号，并且将转矩信号变换为电枢电流给定信号。电流控制器根据转换开关输出的电流给定信号和电流检测信号，经过 PI 运算和 PWM 调节产生 IGBT 的驱动脉冲，并且

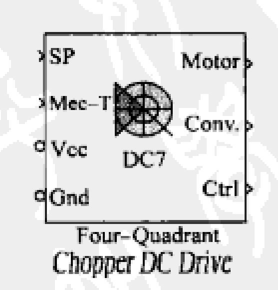


图 8-33　直流斩波可逆系统图标

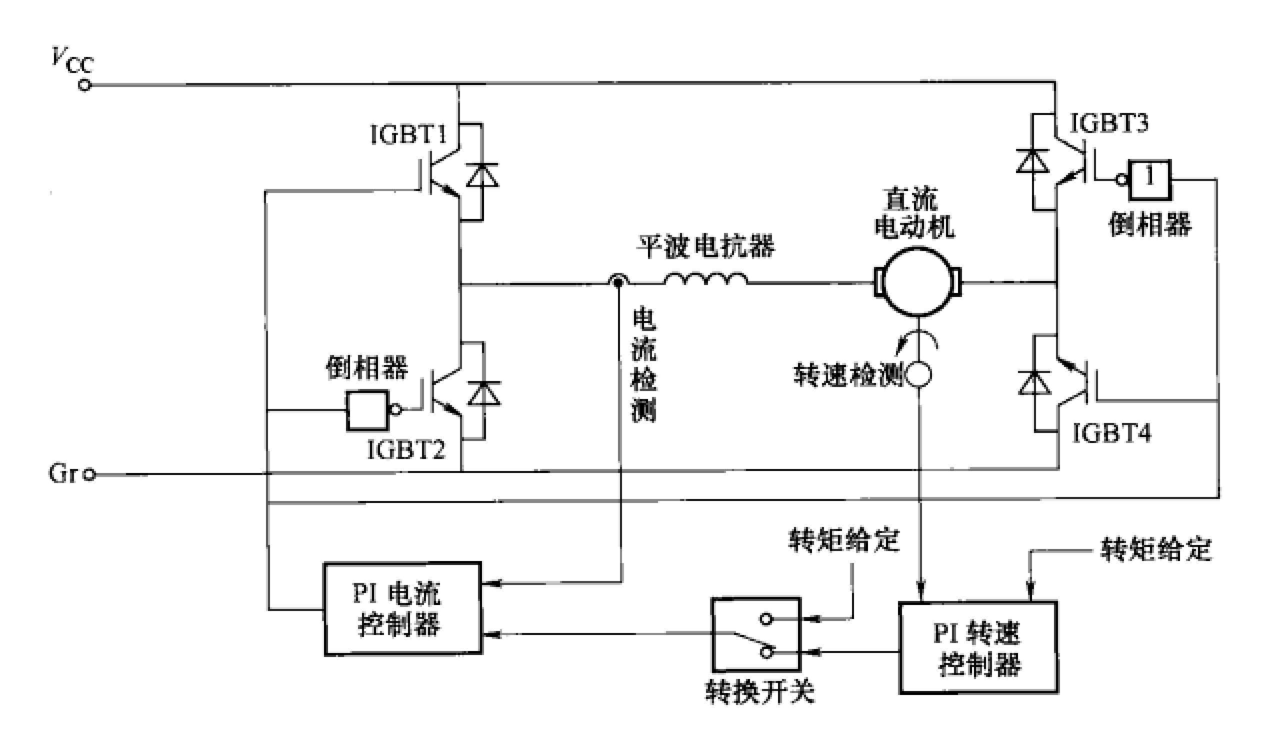


图 8-34 四象限 PWM 控制直流调速系统原理

通过倒相器使 IGBT1、4 和 IGBT2、3 工作在互补工作状态。直流电动机电枢电压 *Vout* 受驱动脉冲占空比 α 方式控制，当转换开关是转速控制方式时，系统为转速电流双闭环控制系统，当转换开关是转矩控制时，系统为转矩闭环控制系统。

模块的输入有 SP、Mec-T、Vcc 和 Gnd 4 个端口，其中输入 SP 用于设定速度和转矩，设定的速度可以是一个阶梯函数，并且速度变化率有加速或减速的限制。输入 Mec-T 用于设定机械负载转矩。输入 Vcc 和 Gnd 分别是直流电压源的连接端，直流电源与电动机的要求相符。模块的输出有三路，Motor、Conv. 和 Ctrl。Motor 端输出电枢电压和直流电动机模块测量端"m"的输出量［速度（speed）、电枢电流（armature current）、励磁电流（field current）和电磁转矩（electromagnetic torque）］。注意速度输出已经将单位 rad/s 换算为 r/min。

Conv. 端输出变流器 IGBT/Diode 组件的电压和电流，还包含变流器输出电压，但是不包括变流器输出电流，因为变流器电流就是电枢电流，Conv. 端输出的电压和电流也可以用多路测量仪（multimeter）观测。

第 3 项 Ctrl 输出控制器参数，这些参数有：

1）电枢电流的设定值；

2）四路 PWM 脉冲；

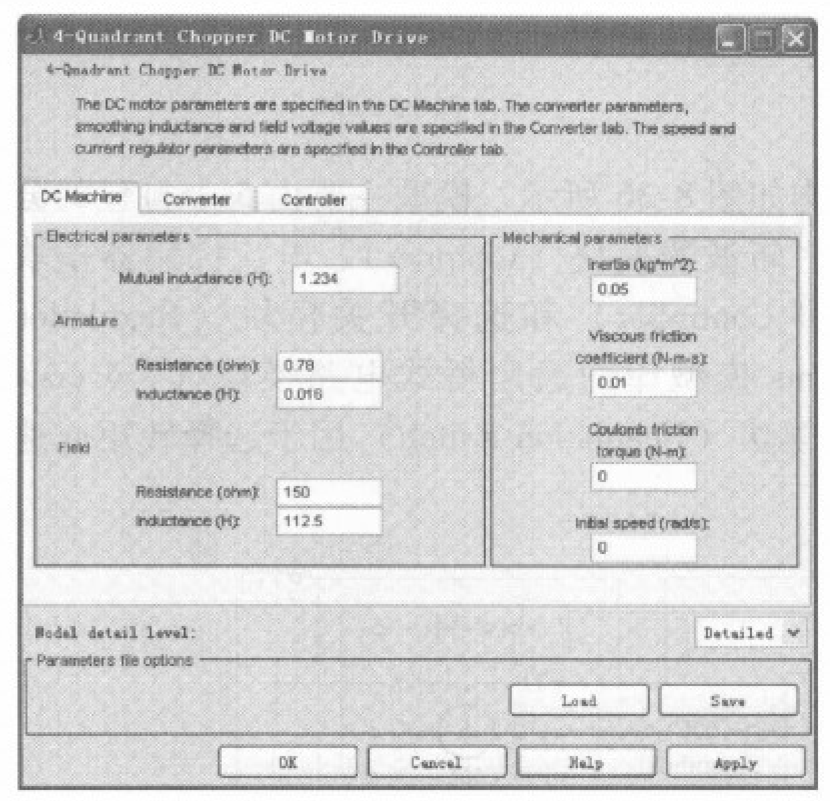
3）速度或转矩的偏差（速度实际值与给定之间偏差，转矩实际值与设定值之间偏差）。

模块的对话框如图 8-35 所示，对话框有三页：DC Machine、Converter、Controller，分别用于设置直流电动机、变流器、控制器参数。

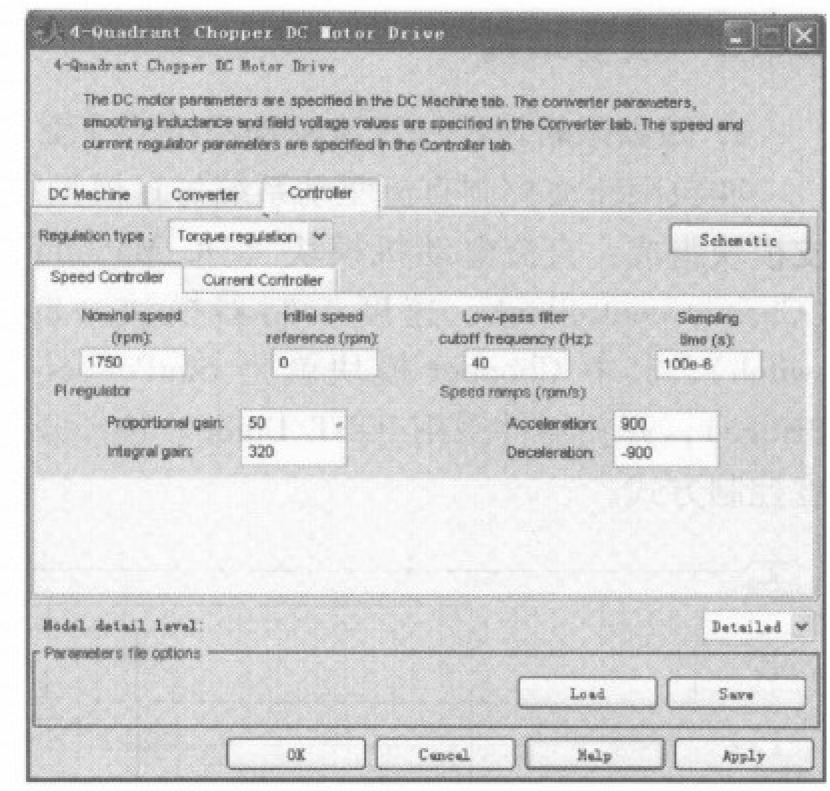
1）电动机参数页（DC Mechine）（见图 8-35a）：有电气参数（Electrical paramenters）和机械参数（Mechanical paramenters）两部分，包括了直流电动机模块的主要参数，参见第 4 章。

2）变流器参数页（Converter）：主要设定电动机电枢串联的平波电抗器电感量（Smoothing inductance），电动机的励磁电压（Field DC source），桥式电路中 IGBT/Diode 和缓冲电阻和电容的参数参见第 3 章。

3）控制器参数页（Controller）（见图 8-35b）：控制器参数页第 1 栏用于选择转矩调节



a)



b)

图 8-35　模块对话框

a）电机参数页　b）控制器参数页

（Torque Regulation）还是转速调节（Speed Regulation）。第 2 栏有转速控制器（Speed Controller）和电流控制器（Current Controller）两部分，其中转速控制器主要参数见表 8-4，电流控制器主要参数见表 8-5。

表 8-4　转速控制器主要参数

转速控制器	参 数 名 称	参　数	单　位
转速设定	额定转速	Nominal speed	r/min
	初始速度	Initial speed	r/min
低通滤波器 Low-pass filter	截止频率	Cutoff frequence	Hz
	采样时间	Sampling time	s
PI 调节器 PI regulation	比例系数	Proportional gain	
	积分系数	Integral gain	
升降速限制 Speed ramps	上升加速度	Acceleration	(r/min)/s
	下降加速度	deceleration	(r/min)/s

表 8-5　电流控制器主要参数

电流控制器	参 数 名 称	参　数	单　位
低通滤波器 Low-pass filter	截止频率	Cutoff frequence	Hz
	采样时间	Sampling time	s
	基准限制	Symmetrical reference limit	pu
PWM 开关频率		PWM Switching frequence	Hz
额定值 Nominal Value	功率	Power	VA
	电压	Voltage	V
PI 调节器 PI regulation	比例系数	Proportional gain	
	积分系数	Integral gain	

8.3.2 模型结构

1. 四象限斩波控制直流驱动系统的模型

四象限斩波控制直流驱动系统仿真模型结构如图 8-36 所示，模型主要由 5 个打包的分支模块组成：直流电动机模块（DC Machine）、斩波器模块（Chopper）、电流控制器模块（Current controller）、速度控制器模块（Speed Controller）和选择开关模块（Regulation switch），其中 Chopper 模块就是 SimPowersystems 模型库的通用桥式电路模块（Universal Bridge），开关器件采用 IGBT/Doide。选择开关模块（Regulation switch）用于选择转矩或速度控制方式。

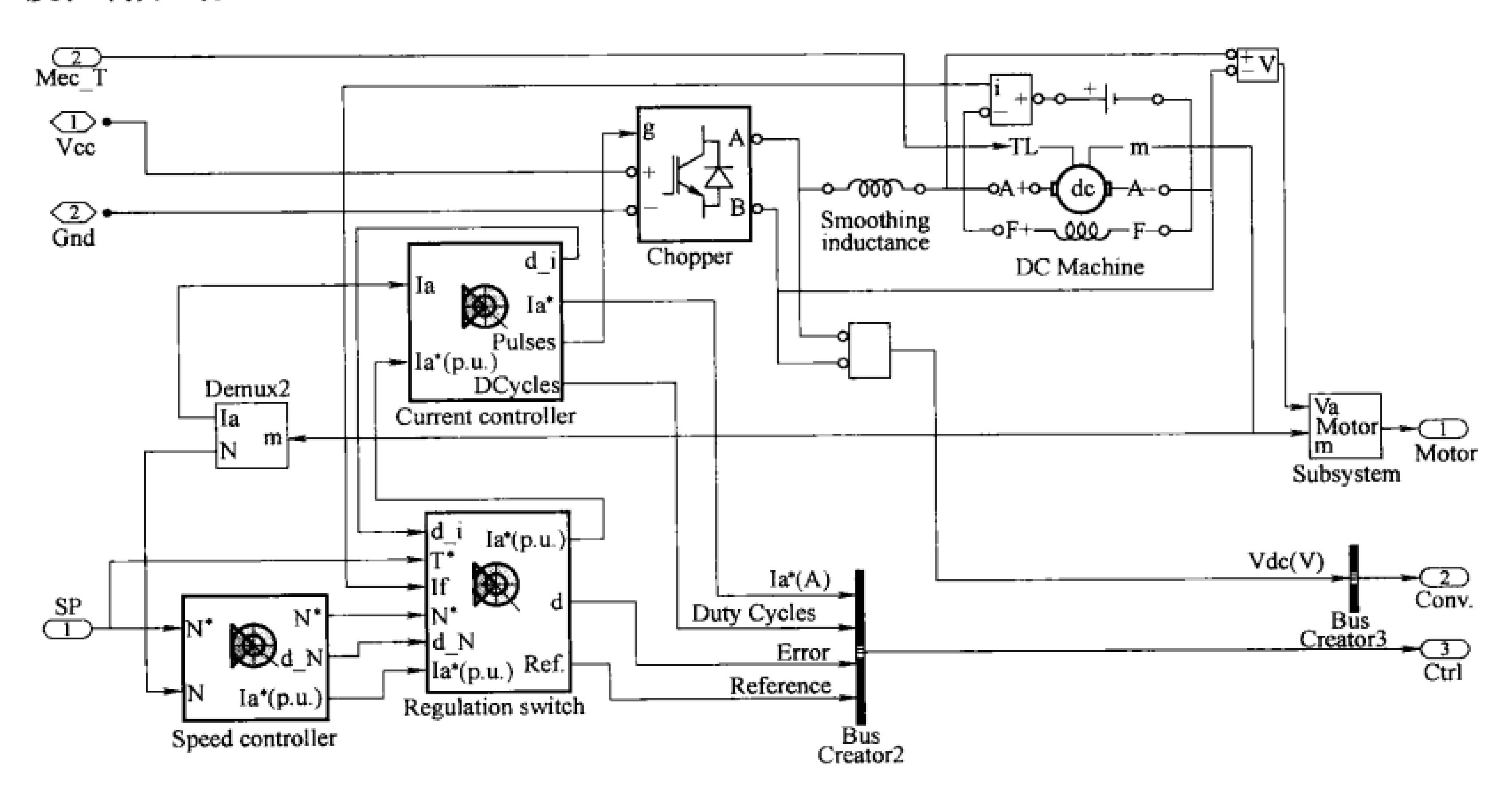


图 8-36 四象限直流 PWM 驱动系统模型

通用桥式电路模块、平波电抗器（Smoothing inductance）和直流电动机模块组成四象限斩波控制直流调速系统的主电路。开关模块、速度控制器模块和电流控制模块组成了系统的控制电路。选择开关模块的输出是电流控制模块的给定输入。

2. 电流控制器结构

电流控制器模块的结构如图 8-37 所示，端口 Ia 输入的电枢电流反馈经过零阶保持器（Zero Order Hold1）采样和低通滤波器（Low-pass fitler）滤波，输入电流调节器（Current controller DISCRETE），电流控制器输出为 PWM 生成的脉宽控制信号，由 PWM 模块生成 IGBT 的驱动信号 Pulse。图 8-38 是模型中低通滤波器（Low-pass fitler）的离散传递函数和对话框。

电流控制器中电流调节器（Current controller DISCRETE）的结构如图 8-39 所示，这是一个离散的带输出限幅的 PI 调节器，调节器比例系数为 K_p，积分系数为 K_i。调节器输入 Ia 是电流反馈，Iref 是转速调节器输出的电流给定信号。电流调节器输出 Ec 是后级 PWM 的脉宽控制信号。

图 8-37 电流控制器（current controller）结构

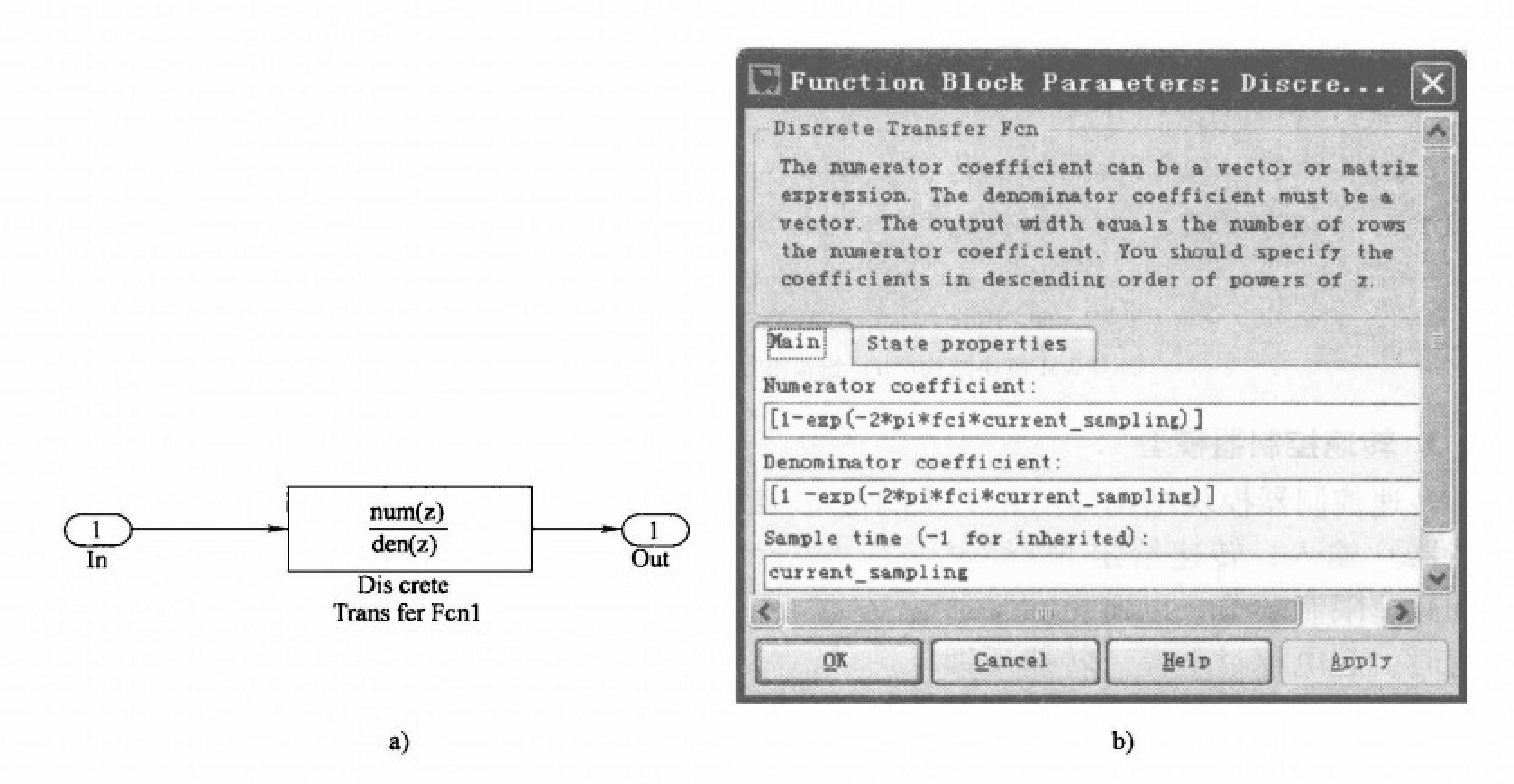


图 8-38 电流控制器的低通滤波器 Low-pass filter

a）结构图 b）对话框

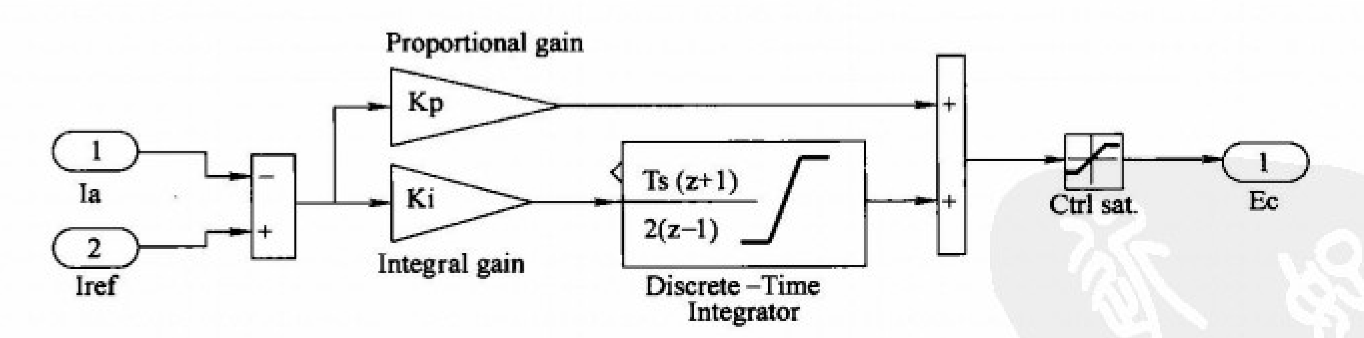


图 8-39 电流控制器 Current controller DISCRETE 结构图

PWM 脉冲发生器模块结构如图 8-40a 所示，模块通过锯齿波与输入 Ref（即电流调节器输出 Ec）比较产生 IGBT 的驱动信号，驱动信号经过反向环节（NOT）和重新组合（Mux）产生四路驱动信号，并通过 Pulse 端输出。图中由 Sawtooth generator 模块产生锯齿波，Sawtooth generator 模块的结构如图 8-40b 所示。电流控制器中的 Duty Cycle 环节用于计算 PWM 调制脉冲的占空比（见图 8-41），使占空比可以从输出端观测到。

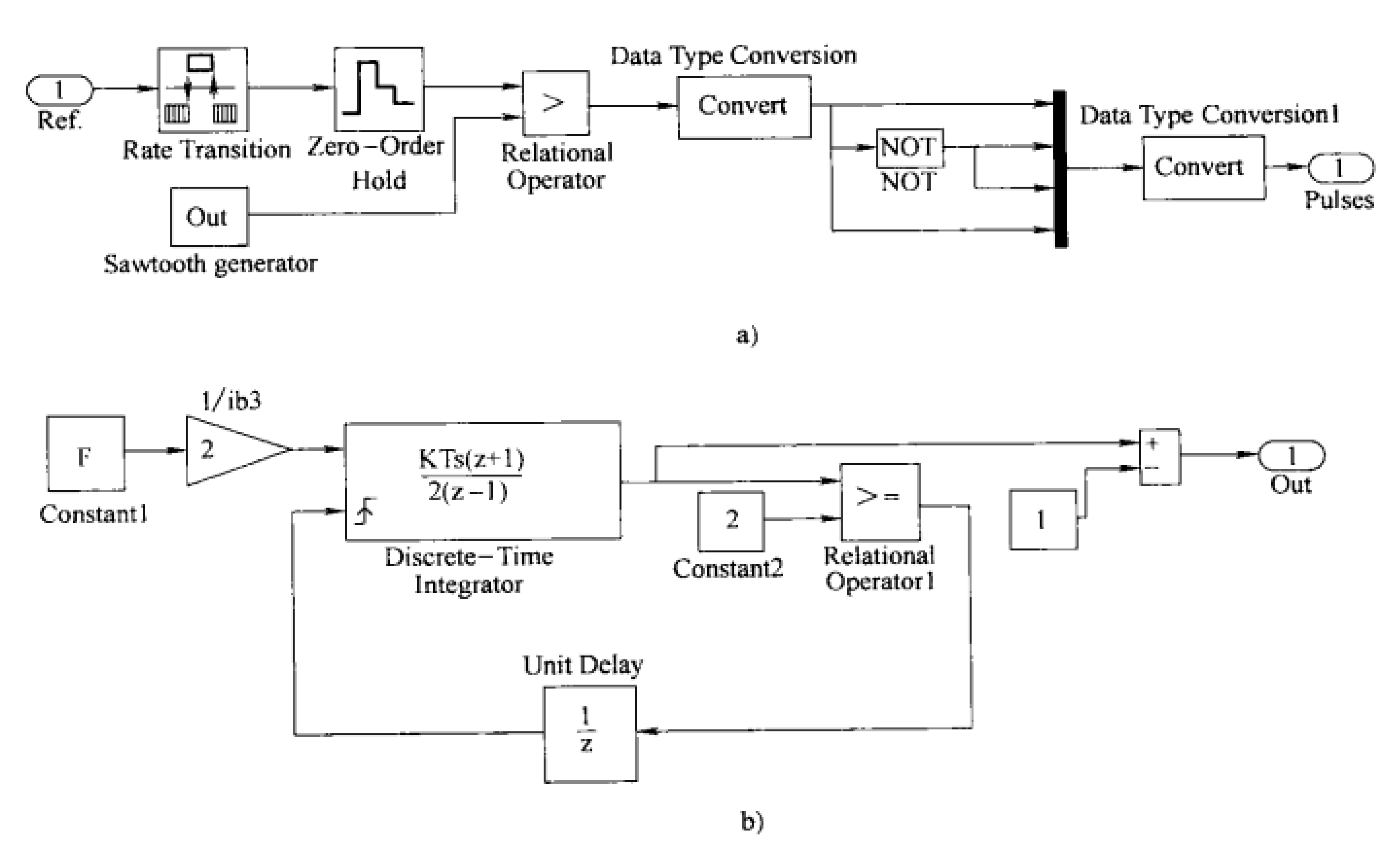


图 8-40 电流控制器 PWM 模块和锯齿波模块结构图

a）PWM 模块结构 b）锯齿波发生器 Sawtooth generator 结构

3. 转速控制器模型

转速控制器模块结构如图 8-42 所示，转速给定 N * 和反馈信号 N 经过采样开关（零阶保持器）输入，转速给定 N * 经过了加减速限制环节，以避免在突加给定时引起电枢过电流。转速反馈信号 N 经过了低通滤波器，PI 调节器的结构与电流调节器相同，调节器的输出是电枢电流的给定（采用标么值），如果是转矩控制方式，则转速控制不起作用。

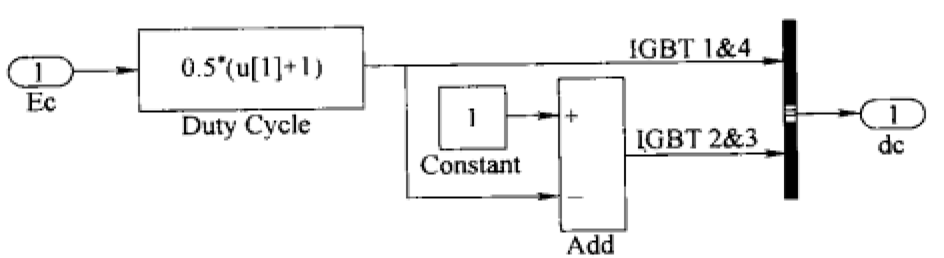


图 8-41 电流控制器的 Duty Cycle 结构图

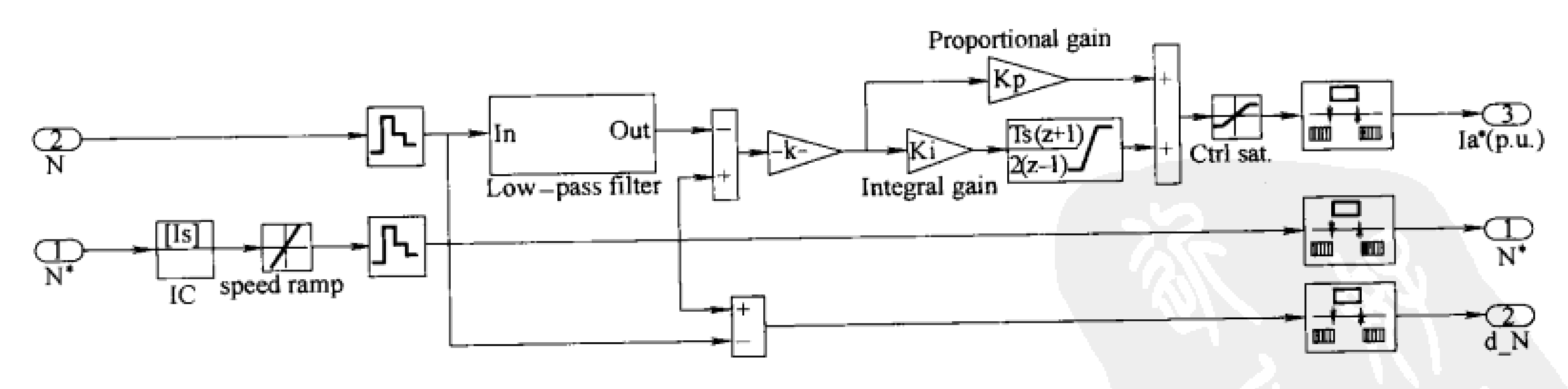


图 8-42 转速控制器模块 Speed Controller 结构图

4. 模块的应用举例 DC7

采用四象限斩波控制模块的直流电动机正反转控制的仿真模型如图 8-43 所示，模型由交流电源、交流/直流变换、四象限斩波控制和检测显示等模块组成。

（1）交流和整流电源 系统的直流电源由三相交流经二极管不控整流提供，模型中 AC

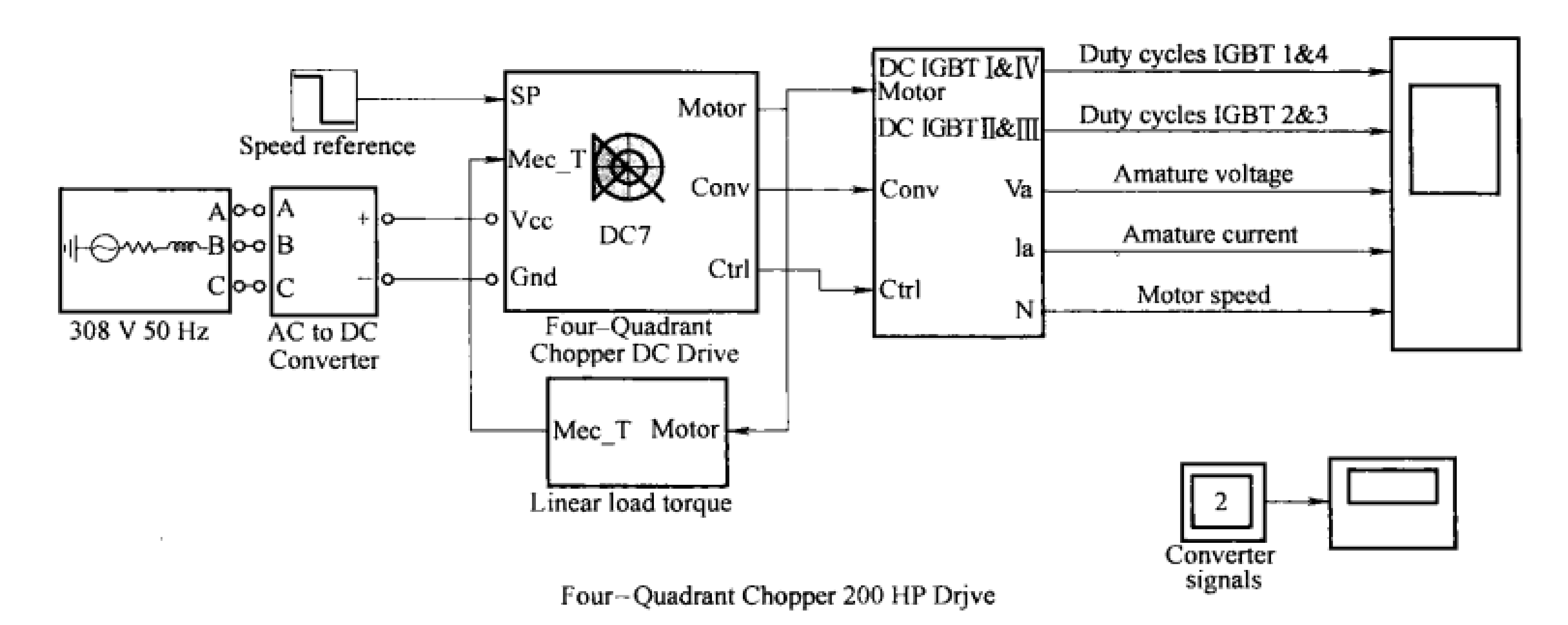


图 8-43 直流电动机四象限 PWM 控制系统模型

to DC Converter 模块包含了三相二极管整流器和制动单元（Braking chopper）两部分（见图 8-44a）。制动单元（Braking chopper）由滤波电容（Cbus）和泵升电压限制电路组成（见图 8-44b），滤波电容使直流母线电压保持稳定，泵升电压限制电路保证直流母线不会出现过电压，当直流母线电压超过规定值时，理想开关（ideal switch）导通，使滤波电容（Cbus）经二极管和电阻回路放电，理想开关的控制单元 Proportional controller（见图 8-44c）。交流电源参数为 380V，50HZ，电源内阻 0.01Ω，电感 0.1mH。Braking chopper 模块参数如图 8-45 所示。

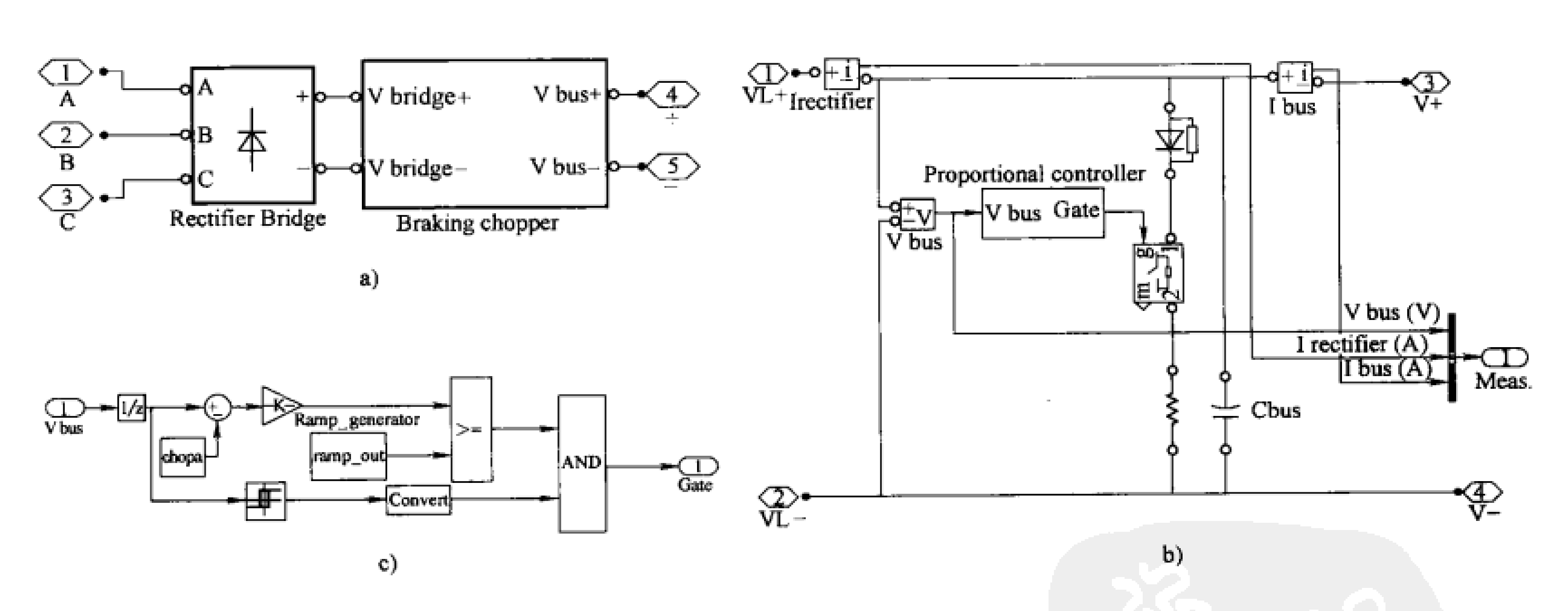


图 8-44 AC to DC Converter 模块

a）AC to DC Converter 模块结构 b）Braking chopper 子模块结构 c）Proportional controller 子模块

（2）转速给定和机械负载转矩

系统要求在 2s 时转速从正转 500r/min 切换到反转 1184r/min，因此设定转速给定 step 模块的，step time 为 2s，初始值（initial value）为 500r/min，Final Value 为 −1184r/min。因为设电动机的机械负载转矩与转速成正比，图 8-43 中子模块 Linear Load torque 通过选择开关，读取了 Four-Quadrant Chopper DC Drive 模块输出端 motor 参数的第 2 项转速值，并乘以 1.01 的系数作为电动机的负载转矩输入（见图 8-46）。

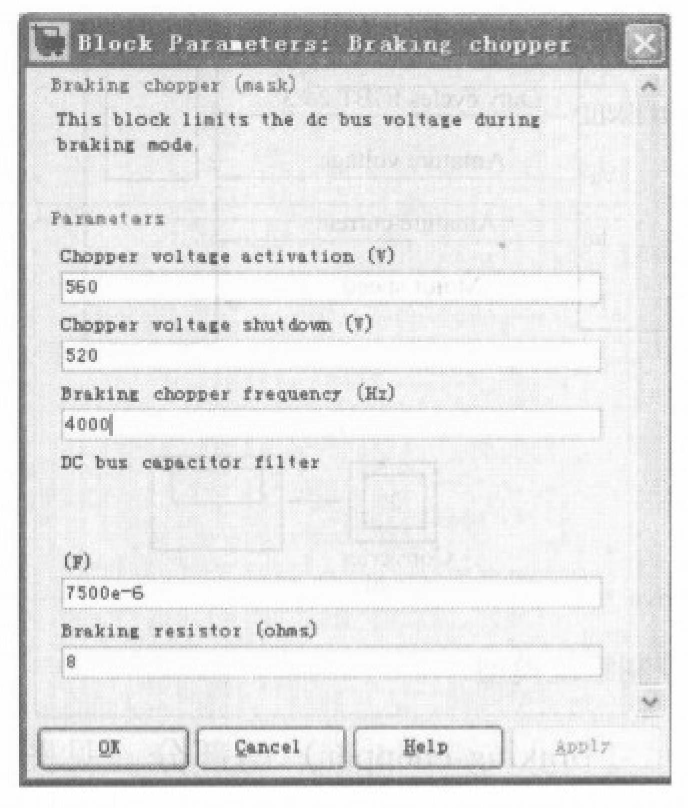


图 8-45 Braking chopper 参数

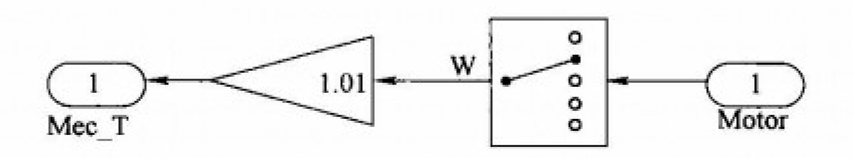


图 8-46 负载转矩模块

（3）电动机参数和控制器参数 电动机功率 200hp⊖，电压 440V，转速 1184r/min，电枢电阻 310Ω，电枢电感 1.57m。励磁电压 310V，励磁绕组电阻 310Ω，励磁绕组电感 232.5H，电枢与励磁互感 3.32H，电动机转动惯量 $10kg \cdot m^2$，电动机加减速度限制为 ±400r/min/s。平波电抗器电感量 1mH，转速控制器和电流控制器参数见表 8-6。

表 8-6 四象限斩波控制模块的控制器参数

转速控制器			
转速设定	额定转速（Nominal speed）	r/min	1184
	初始速度（Initial speed）	r/min	0
低通滤波器（Low-pass filter）	截止频率（Cutoff frequence）	Hz	40
	采样时间（Sampling time）	s	100e-6
PI 调节器（PI regulation）	比例系数（Proportional gain）		250
	积分系数（Integral gain）		1000
升降速限制（Speed ramps）	上升加速度（Acceleration）	(r/min)/s	400
	下降加速度（deceleration）	(r/min)/s	-400
电流控制器			
低通滤波器（Low-pass filter）	截止频率（Cutoff frequence）	Hz	500
	采样时间（Sampling time）	s	20e-6
PWM 开关频率	基准限制（Symmetrical reference limit）	pu	1.5
	PWM Switching frequence	Hz	5e3
额定值（Nominal Value）	功率（Power）	VA	200*746
	Voltage	V	440
PI 调节器（PI regulation）	比例系数（Proportional gain）		2
	积分系数（Integral gain）		200

⊖ 非法定单位，1hp = 745.7W。

（4）仿真参数和结果　因为模型控制器中有滤波器和采样开关等，转速控制器和电流控制器的采样频率不同，仿真算法应设为混合步长（Fixed-step）并采用离散算法（discrete），仿真时间设为7s。模型运行得到的波形如图8-47所示，图8-47d和图8-47e是电动机从正转到反转过程中，IGBT1、4、IGBT2、3驱动脉冲占空比的变化，图8-47b和图8-47f为电枢和电抗器两端电压波形，图8-47a为转速变化过程，图8-47b为电枢电流变化曲线。电动机在起动时给定转速为500r/min，电动机从静止起动，1.3s时上升到500r/min，上升加速度为400r/min/s，电枢电流也匀速上升。电动机速度达到给定后进入稳定正转状态，电枢电流略有下降，因为不需要再加速仅需要与负载转矩平衡。在2s时转速给定改变为-1184r/min，由于转速调节器和电流调节器的调节作用，IGBT1、4占空比下降，IGBT2、3占空比上升，使电枢电压下降，电流下降，电磁转矩也随之减小，电动机开始减速。在2.2s时，电流反向，产生制动转矩，制动时会引起直流母线电压的升高，制动单元将保持直流母线不会发生过电压情况。到3.25s时，转速下降到零，在反向电流作用下，电动机转向改变，并且负载转矩也随转速变负，电动机以-400r/min/s加速度反方向升速，在6.3s时达到-1184r/min，完成电动机正反转过程的仿真。

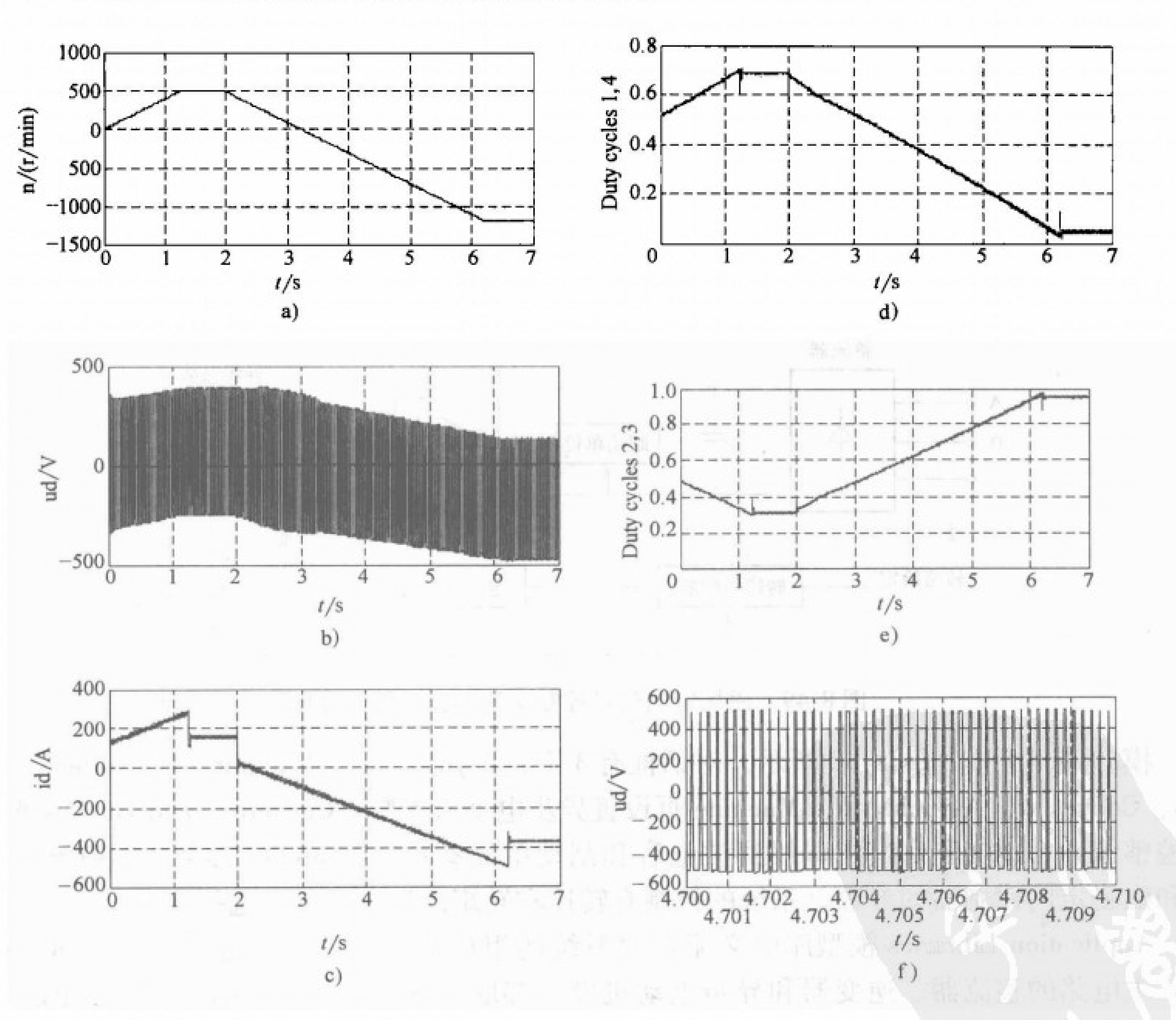


图8-47　PWM直流电动机正反转控制波形

a）电动机转速　b）电枢电压　c）电枢电流　d）IGBT1，4的占空比　e）IGBT2，3的占空比

f）斩波器输出电压（局部）

8.4 三相异步电动机磁场定向矢量控制系统

三相异步电动机磁场定向矢量控制系统模块（Field-Oriented Control Induction Motor Drive）图标如图 8-48 所示，系统模块的原理如图 8-49 所示，系统主电路由三相不控桥、直流母线、三相逆变器和异步电动机组成，逆变器由转速控制器和磁场定向控制器控制，直流母线上有滤波电容和制动单元。磁场定向控制器用于完成电动机转子磁场观测、定向、坐标变换、PWM 调制和驱动信号的产生和分配，是系统的重要控制单元。

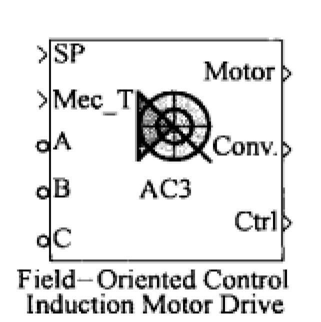


图 8-48 磁场定向矢量控制系统图标

模块输入有 SP、Mec-T、A、B、C 5 个端口，其中输入 SP 用于设定转速，设定的转速一般是阶梯函数，为了避免给定突变时可能带来的电流和转矩冲击，模块有加减速的限制。输入 Mec-T 用于设定机械负载转矩，如果负载转矩与转速符号相反，则加速转矩取决于电磁转矩和负载转矩之和。A、B、C 是三相电源输入端。

模块输出有三路，Motor、Conv. 和 Ctrl。Motor 端口可以通过电动机测量模块 motor demux 观测电动机的参数，包括转速、定子和转子的电流、磁通等。Conv. 端口输出变流器参数，包括直流母线电压、整流器输出电流和逆变器输入电流等，这些参数也可以通过多路测量器 multimeter 来观测。Ctrl 端输出控制器参数，包括转矩给定、实际速度与速度给定之间的偏差等。

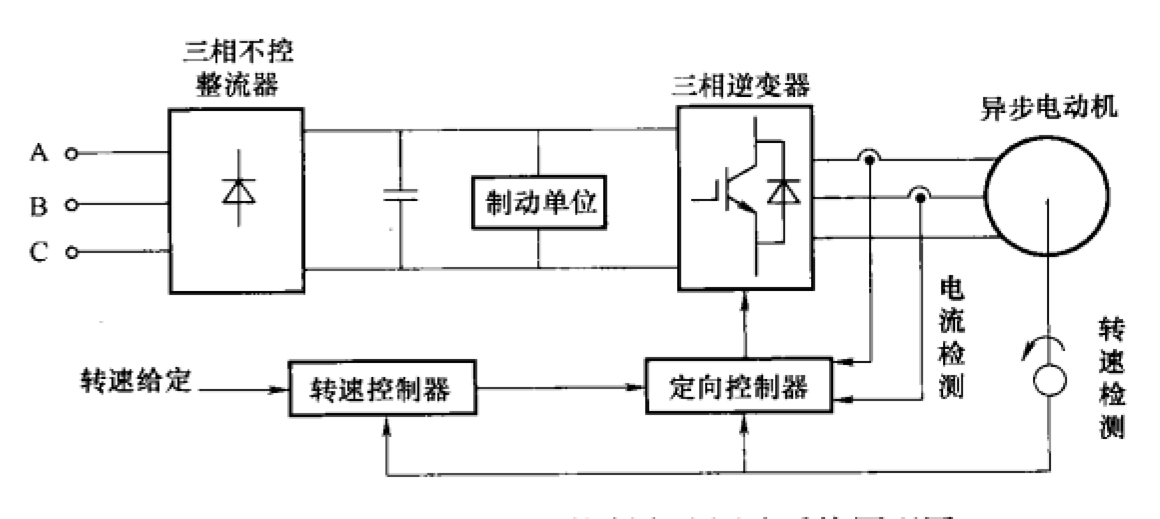
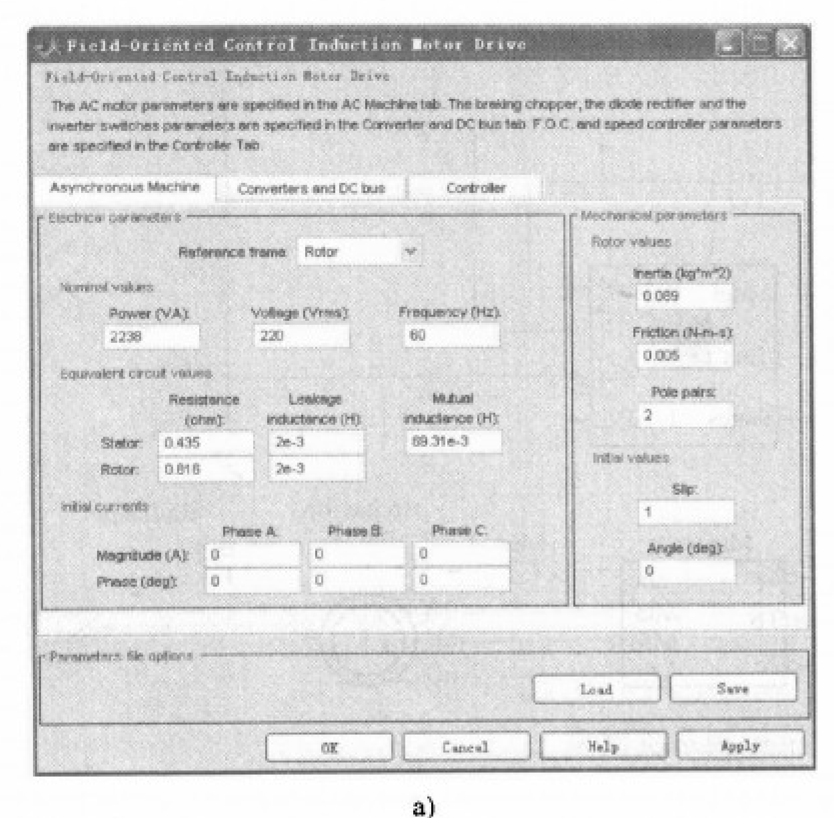


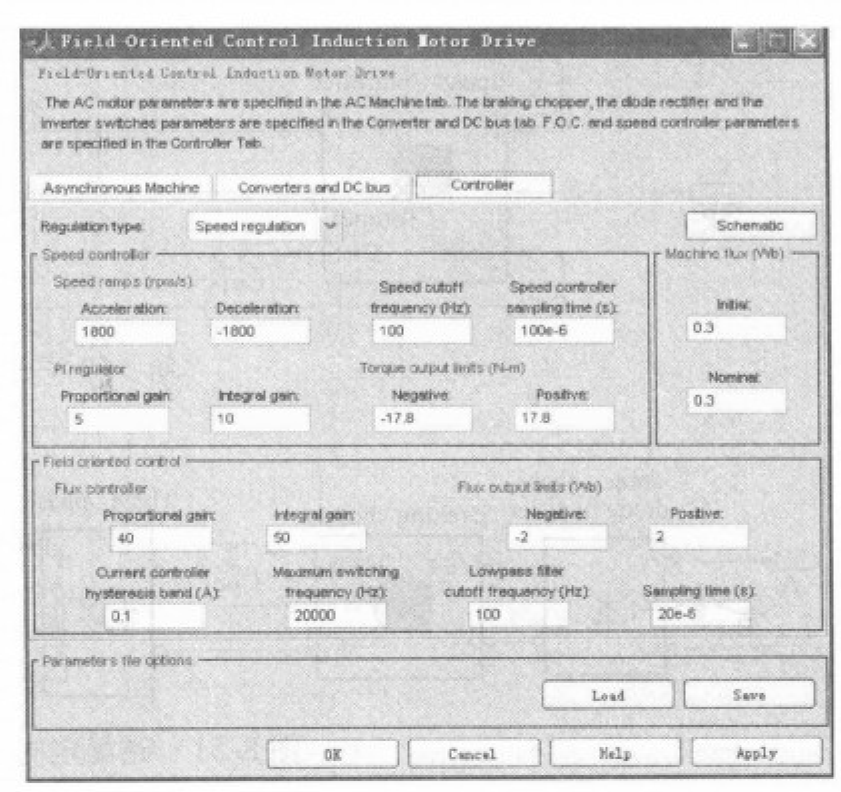
图 8-49 磁场定向矢量控制交流调速系统原理图

模块的对话框如图 8-50 所示，对话框有 3 页：Asynchronous Machine、Converters and DC bus、Controller。Asynchronous Machine 页设置异步电动机参数，Converters and DC bus 页设置不控整流器、逆变器和直流母线滤波电容和制动单元参数，Controller 参数页包括转速控制器和磁场定向控制器的参数，系统的控制有转速和转矩两种方式可以选择。

Application Libraries 模型库中交流调速系统的组成基本相同，主电路是 AC/DC/AC 结构，主电路的整流器、逆变器和异步电动机模型都取自 Simpowersystems 模型库，因此对话框中的参数也与模型库相应模块的参数相同。直流母线的滤波电容和制动单元结构和参数与直流 PWM 调速系统主电路中的相同。各种系统的不同在于采用不同的电动机和控制策略，在磁场定向控制中控制策略体现在定向控制器中，各系统也有基本相同的转速控制器，因此



a)



b)

图 8-50　磁场定向控制系统对话框

a）电机参数页　b）控制器参数页

在以下调速系统介绍中重点介绍体现控制策略的模块。系统中的控制器模块计算都是离散的，并且转速控制器和反映控制策略的模块有不同的采样时间（在对话框中设定）。

8.4.1　转速控制器

磁场定向矢量控制系统模型如图 8-51 所示，模型由二极管整流器、三相逆变器、异步电动机组成的主电路和转速控制器（Speed Controller）、定向控制器（F. O. C.）等组成。其中转速控制器（Speed Controller）结构如图 8-52 所示。转速给定 N* 经过加减速限制环节（Rate Limiter），使阶跃输入时实际转速给定有一定的上升和下降斜率，转速反馈 N 经过了低通滤波器（Low pass filter）得到转速偏差（N* － N）。Proportional gain、Integral gain 和 Discrete-Time Integrator 模块组成带限幅的离散 PI 调节器，调节器输出经过了选择开关，根据对话框中设定的转矩或转速控制方式决定转速控制器的输出。加减速斜率、PI 调节器比例和积分系数、低通滤波器截止频率（Cutoff Frequency）等参数都在对话框中设定。

转速控制器（见图 8-52）中有一个磁通表（Fulx table），磁通表使电动机在基速以下保持额定磁通，基速以上进行弱磁控制，磁通表是一个 Look up 模块，其设定见表 8-7，在 2000r/min 以下保持额定磁通 nf，在 2500r/min 以上开始弱磁，额定磁通 nf 在定向控制器（F. O. C.）对话框中设定。

表 8-7　磁通表（Fulx table）

转速/(r/min)	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
磁通/Wb	nf	nf	nf	nf	nf	0.9nf	0.72nf	0.51nf

注："nf" 为额定磁通设定值。

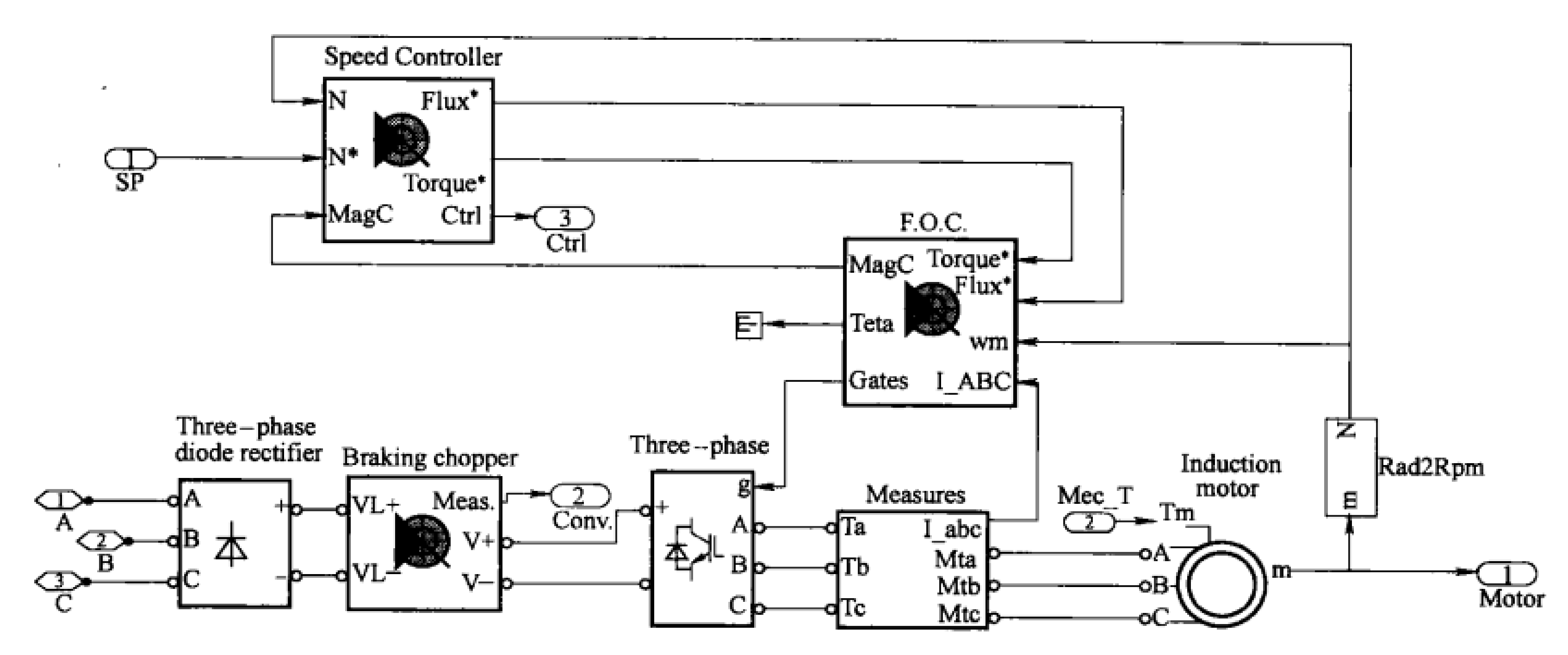


图 8-51　磁场定向矢量控制系统模型

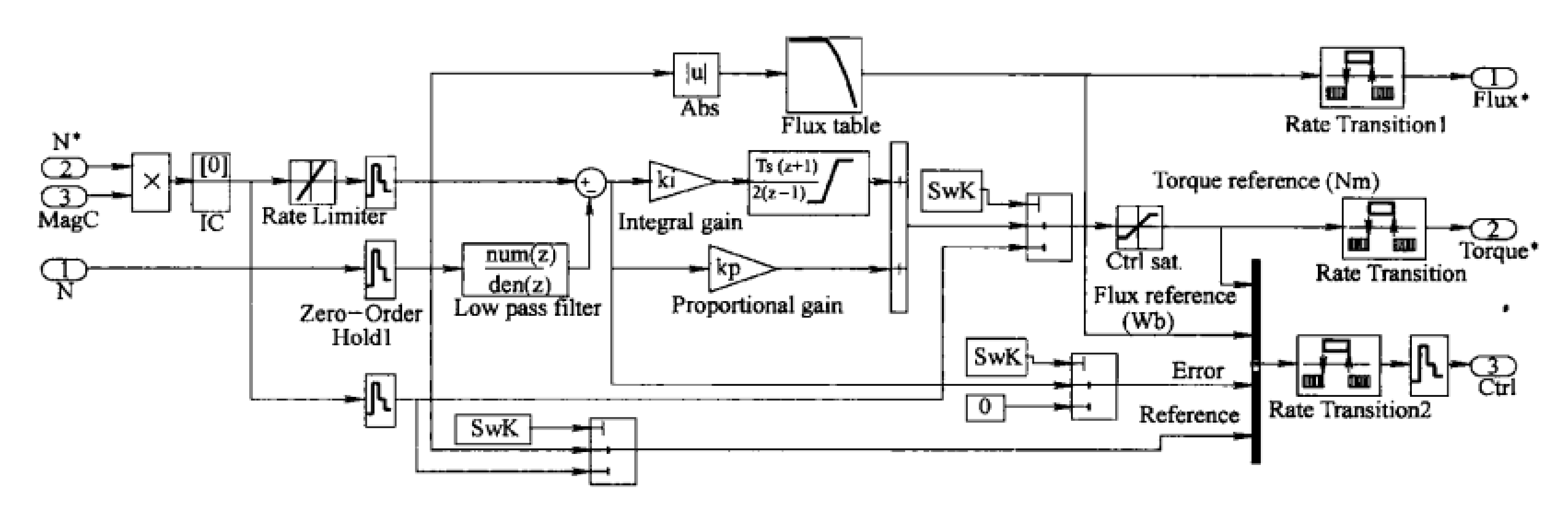


图 8-52　转速控制器 Speed Controller 结构

8.4.2　定向控制器

定向控制器（F. O. C）是矢量控制的核心模块，模块结构如图 8-53 所示，模块的功能是：

1）将输入的定子三相电流经过 3s/2r 变换（ABC-DQ 模块）得到 dq 坐标系上的两相电流 isd、isq。

2）由磁通观测器（模块 Flux Calculation）计算转子磁链 ψ_r(Phir)：Phir = Lm × id/(1 + TrS)，由模块 Teta Calculation 计算转子转角 θ_e（Teta）：Teta = L_m^*(I_q)/phir*(Lr/Rr) + Pω_m)。

3）由磁通调节器 Flux-PI 模块计算转子磁链给定值 Phir*（见图 8-54），由励磁电流模块 id* Calculation 计算定子电流励磁分量 id：id* = Phir/Lm。

4）根据转速调节器输出 Torque* 和转子磁链 Phir 计算定子电流转矩分量 isq：

$$isq = (2/3) * (1/p) * (Lr/Lm) * Te^*/Phir$$

5）根据定子电流励磁分量 isd 和定子电流转矩分量 isq 经过 2r /3s 变换（DQ-ABC 模块）得到三相定子电流的给定值 i^*abc。

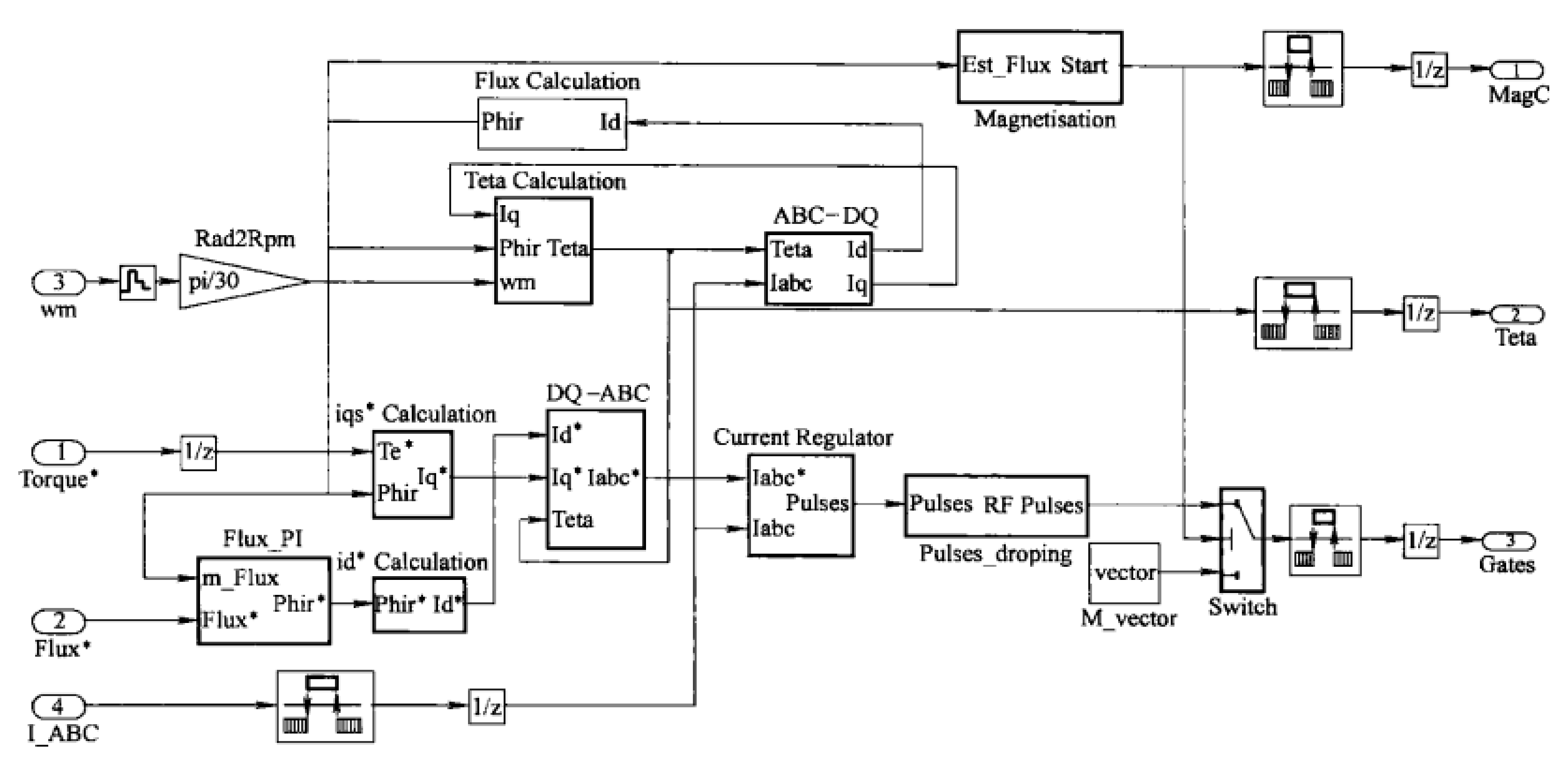


图 8-53　定向控制模块（F. O. C.）结构

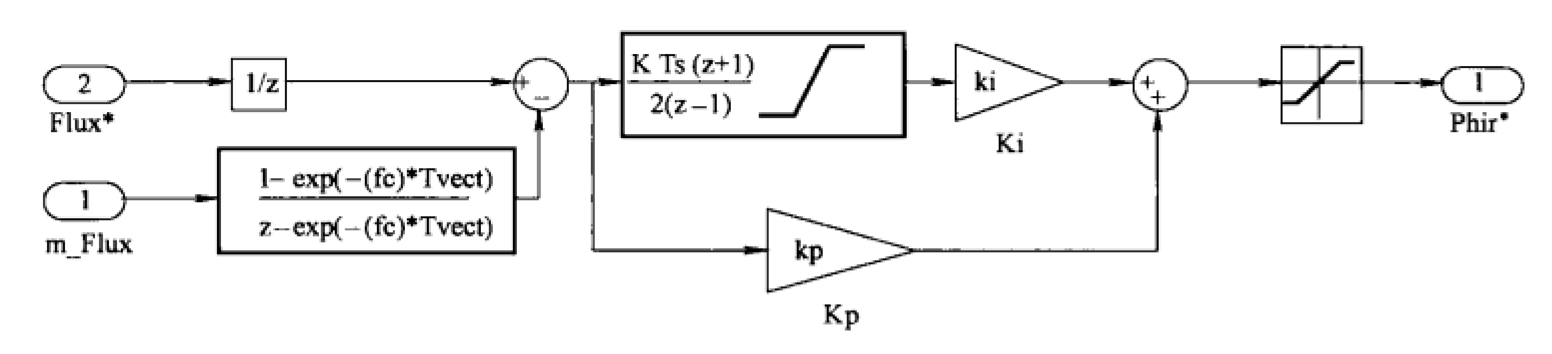


图 8-54　磁链给定值 Flux-PI 计算结构

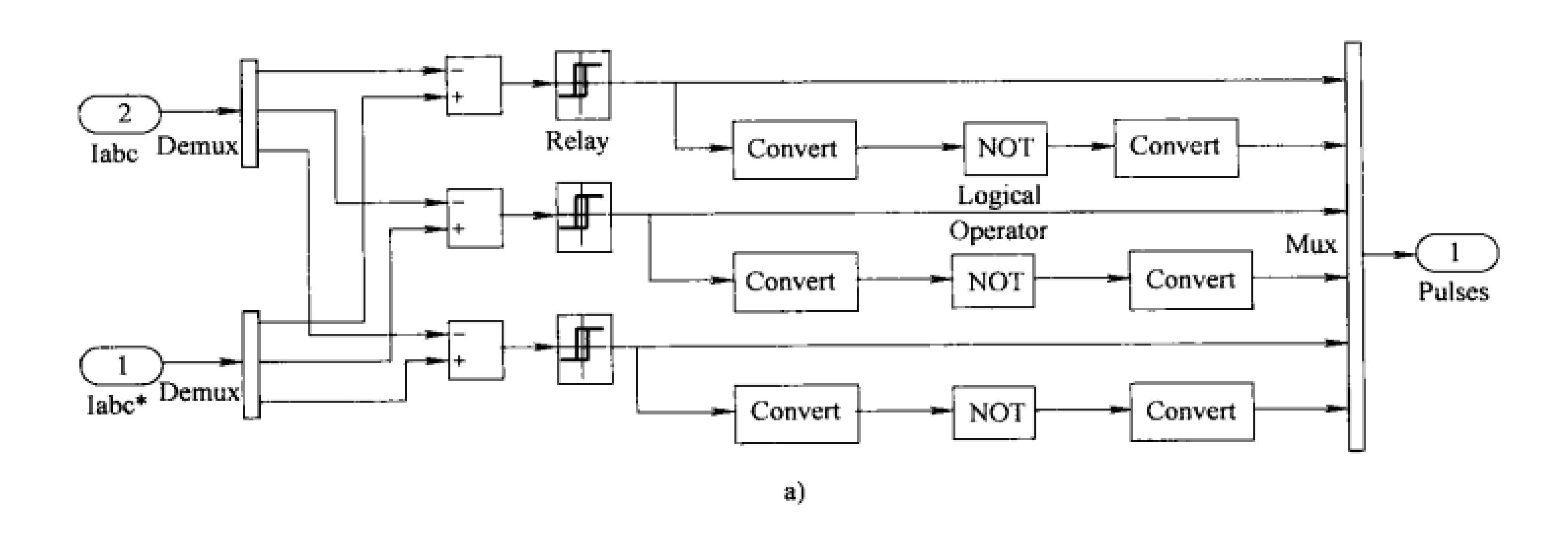
6）三相定子电流的给定值 i^*abc 与定子电流的实际值 $iabc$ 经过电流调节器（Current Regulation）得到 6 个驱动信号 Pulses，电流调节器由 3 个滞环控制器（Relay）组成，并经过 3 个逻辑非模块（Logical Operator）得到 6 路驱动信号（见图 8-55a）。滞环控制器的环宽由对话框中电流控制器参数（Current controller hysteresis band）设定。电流调节器（Current Regulation）之后的 Pulses droping 模块内有 3 个 D 触发器（D Flip-Flop）（见图 8-55b），用于限制开关频率，改善脉冲波形。

8.4.3　模块应用举例 AC3

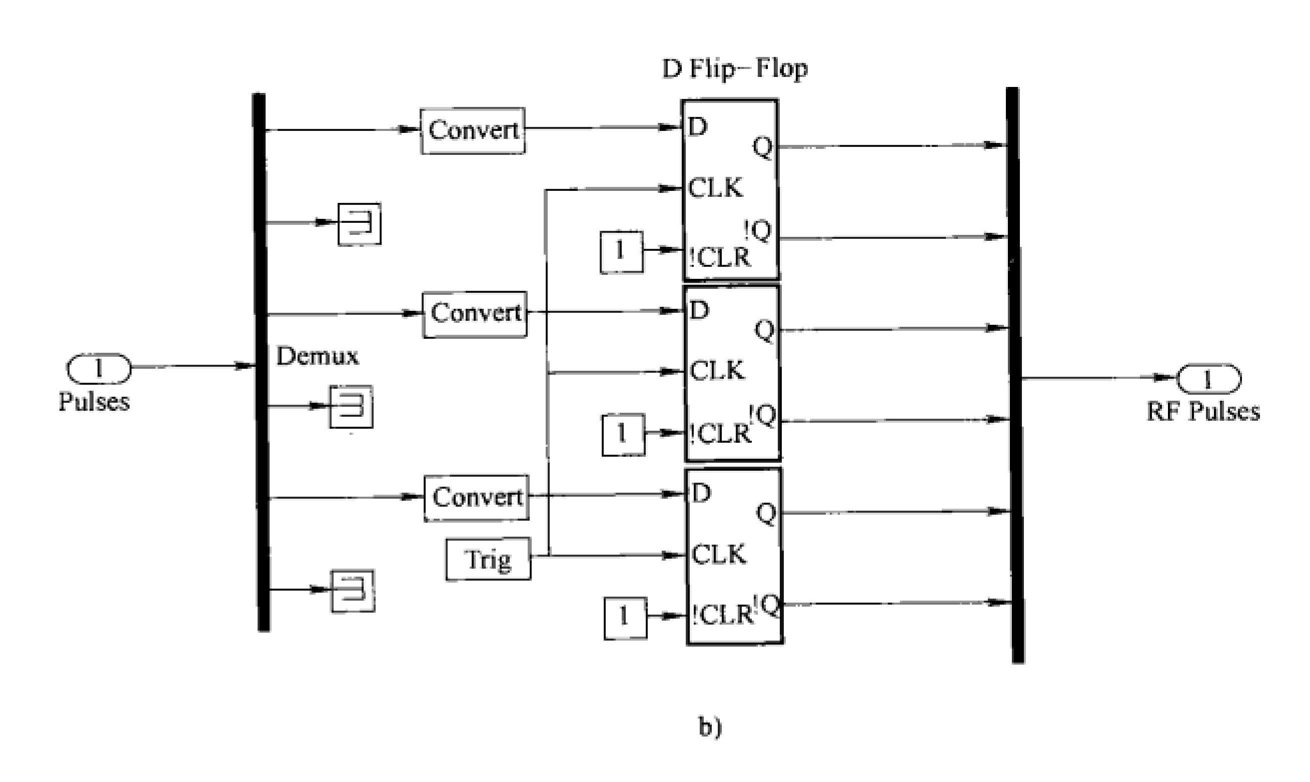
磁场定向控制异步电动机调速系统仿真模型结构如图 8-56 所示，模型由磁场定向控制系统模块（Field-Oriented Control Induction Motor Drive），三相电源（460V、60Hz），速度给定（Speed reference），负载转矩给定（Torque reference）和检测单元（demux），Machine terminal voltages 等模块组成。

（1）电动机参数和控制器参数　电动机功率 149.2kVA，电压 460V、60Hz，定子电阻 14.85Ω，电感 0.3027×10^{-3}H，互感 10.46×10^{-3}H。转子电阻 0.295×10^{-3}Ω，电感 0.3027×10^{-3}H。电动机转动惯量 3.1kg · m^2，摩擦系数 0.08，极对数 2。

（2）转速调节器和定向控制器参数　转速控制器和定向电流控制器参数见表 8-8。



a)



b)

图 8-55　脉冲生成环节

a）电流调节器 Current Regulation 结构　b）D 触发器模块

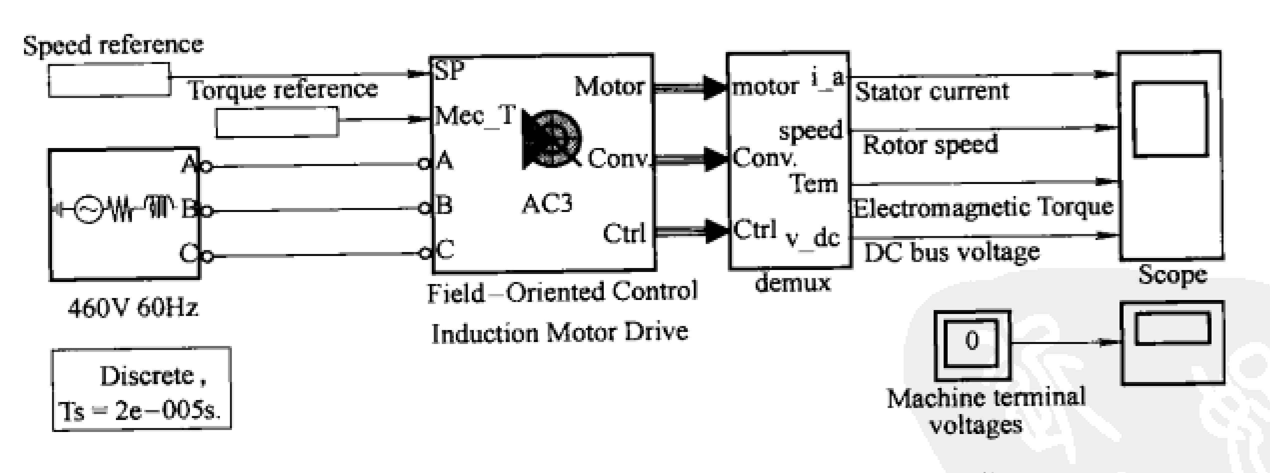


图 8-56　磁场定向控制异步电动机调速系统仿真模型

（3）仿真参数　仿真参数如图 8-57 所示，仿真算法应采用混合步长（Fixed-step）并采用离散算法（dicrete），仿真时间设为 3s。

（4）仿真结果　系统的转速设定为：起动 $t=0$ 时转速给定 $n*=500\text{r/min}$，$t=1\text{s}$ 时转速 $n^*=0$，起动时负载转矩 $T_L=0$，$t=0.5\text{s}$ 时加载 $T_L=795\text{N}\cdot\text{m}$，$t=1.5\text{s}$ 时负载转矩从正变为 $T_L=-795\text{N.m}$。即电动机空载起动，0.5s 时加载电动机为正转电动状态，1s 时电动机

表 8-8 定向控制系统控制器参数

转速控制器(speed controller)			
调节类型	Regulation type		Speed Regulation
低通滤波器	截止频率(Cutoff frequence)	Hz	1000
(Low-pass filter)	采样时间(Sampling time)	s	5 * Ts
PI 调节器	比例系数(Proportional gain)		300
(PI regulation)	积分系数(Integral gain)		2000
升降速限制	上升加速度(Acceleration)	(r/min)/s	900
(Speed ramps)	下降加速度(deceleration)		-900
转矩输出限制	Positive	N · m	1200
(Torque output limits)	Negative		-1200
电动机磁通	初始值(initial)	Wb	0.73
(Machine flux)	额定值(Nominal)		
初始值	转子滑差(slip)		1
(Initial values)	转子初始位置(Angle)	deg	0
定向控制器(Field oriented control)			
磁通控制器	比例系数(Proportional gain)		100
(Flux controller)	积分系数(Integral gain)		30
电流控制器	滞环宽(hysteresis band)	A	10
(Current Controller)	最大开关频率	Hz	20000
磁通输出限制	正向限制(Positive)	Wb	2
(Flux output limits)	负向限制(Negative)		-2
低通滤波器	截止频率(Cutoff frequence)	Hz	100
(Low-pass filter)	采样时间(Sampling time)	s	Ts

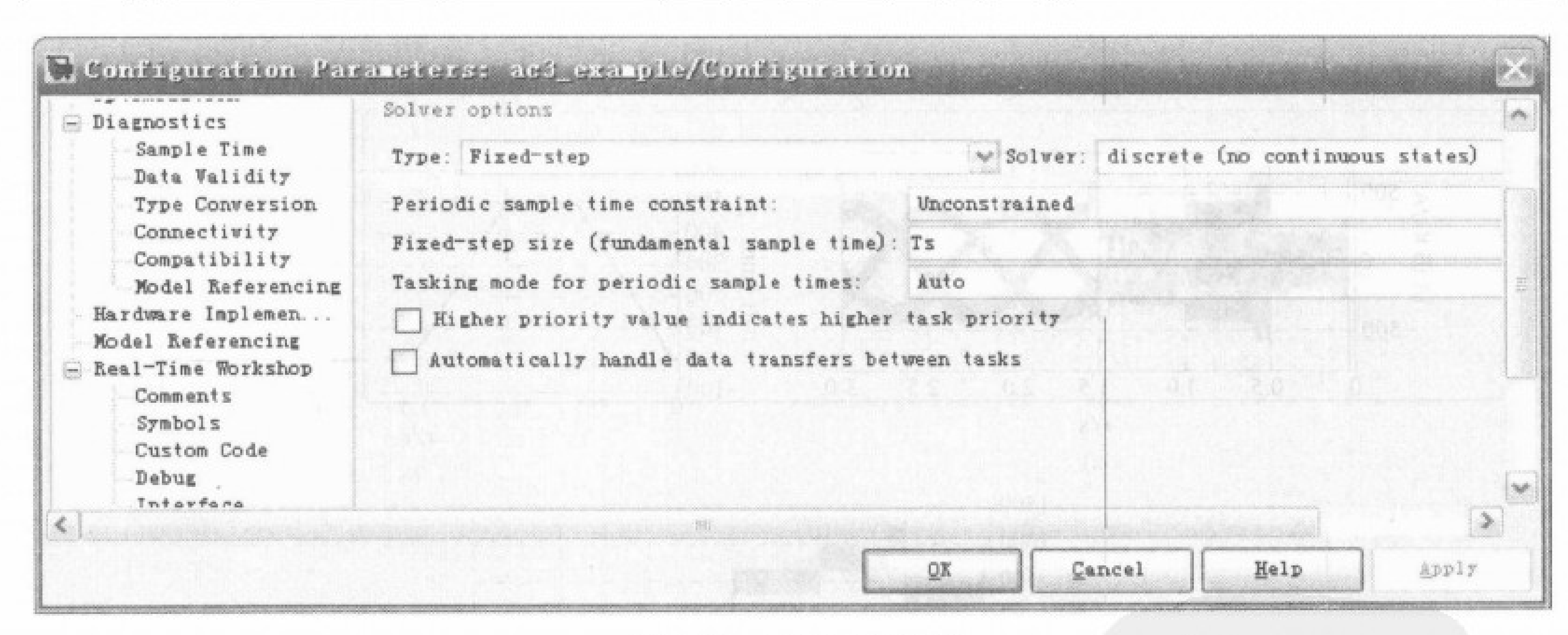


图 8-57 仿真参数设置

减速，1.5s 时转速基本下降到 0，同时负载转矩变负，电动机应产生相应的反转矩抵消负的负载转矩，使转速保持为 0。从图 8-59b 中可以看到，在突加转速给定起动时，电动机转速按规定的加速度上升，在 0.6s 时转速基本达到 500r/min，在 0.6～1s 间保持匀速旋转，这时定子电流频率为 16.66Hz（见图 8-59a），对于 2 对极电动机转速为 500r/min。然后电动机按规定的减加速度下降，定子电流频率也下降，1.5s 时转速下降到 0，这时电动机产生的负电磁转矩抵消了负载转矩，保持转速为 0，电动机定子电流的频率下降为 0.71Hz，电动机的同步转速为 21.46r/min，考虑异步电动机的转差，转子实际转速为 0，达到了控制的要求。图 8-58 是定向控制模块（见图 8-53）中 DQ-ABC 模块的输入和输出，其输入为电流的励磁、

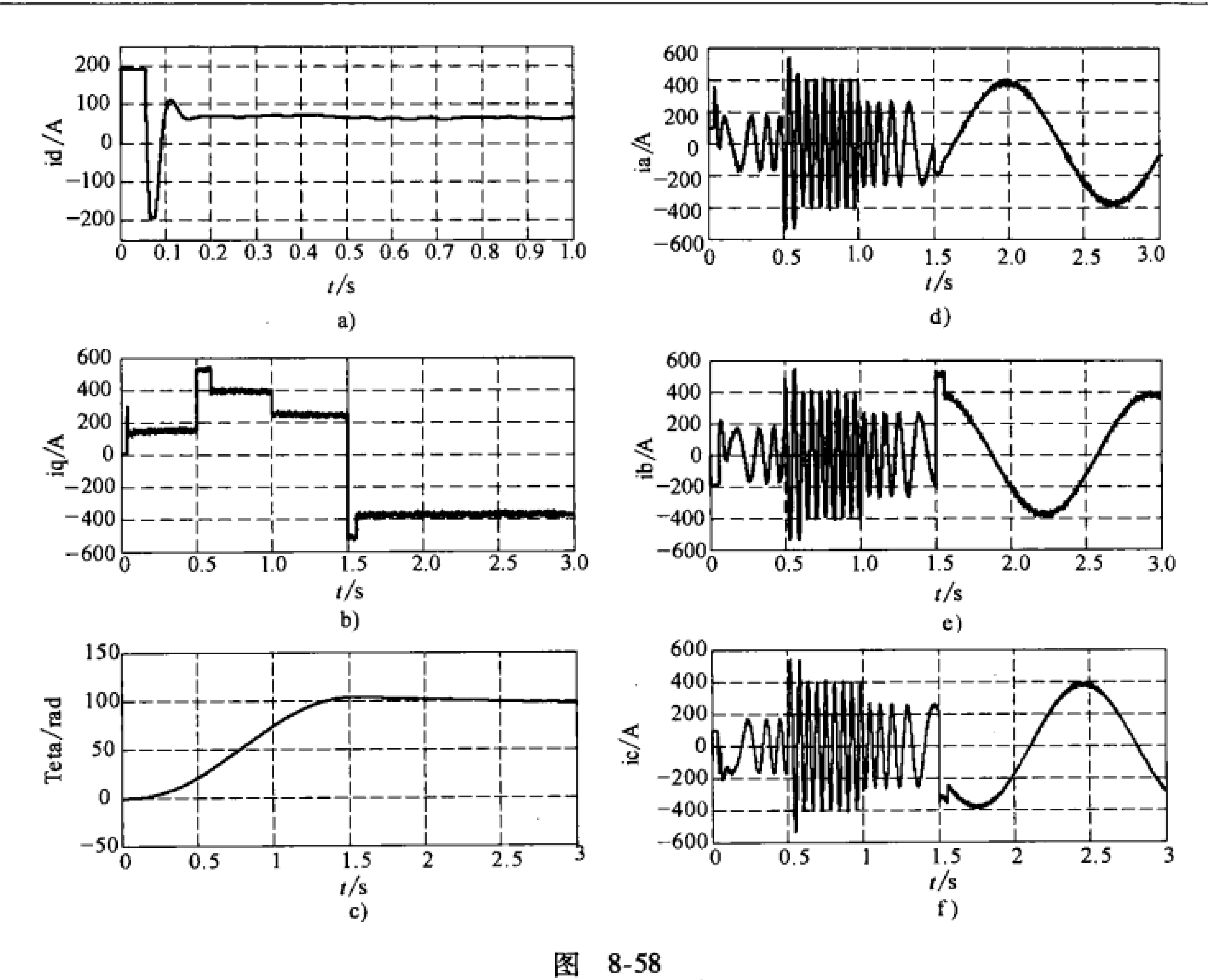


图 8-58

a）电流励磁分量 b）电流转矩分量 c）转子转角 θ_r d）A 相电流给定 e）B 相电流给定 f）C 相电流给定

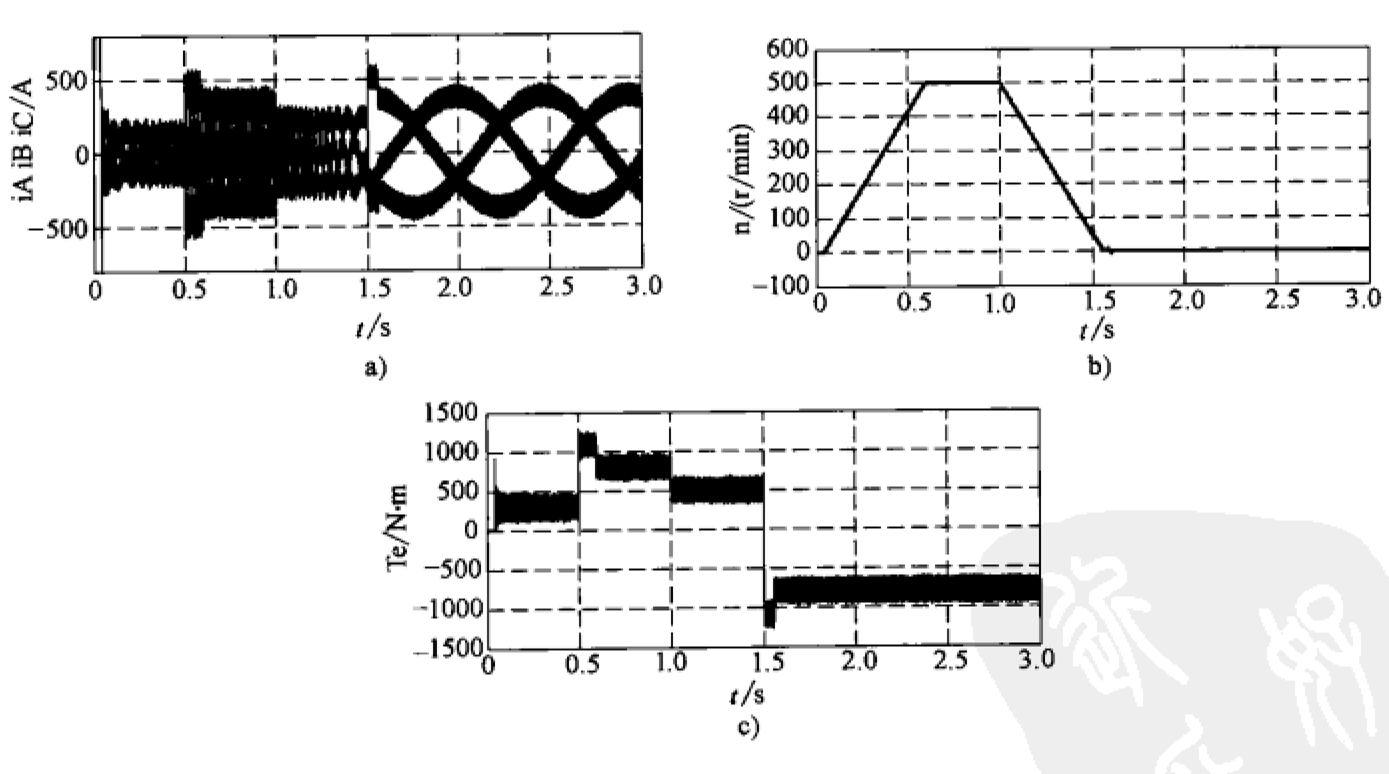


图 8-59 2r/3s 坐标系变换波形

a）定子三相电流 b）电动机转速 c）电动机转矩

转矩分量和转子转角 θ_r，输出是 2r/3s 坐标系变换后的三相定子电流给定信号，给定信号的频率和幅值都随转矩和转速变化。图 8-60 为电动机定子和转子的旋转磁场轨迹，除起动瞬间磁链有脉动外，定转子磁链旋转轨迹都呈很好的圆形，保证了转速变化时的恒磁通控制。

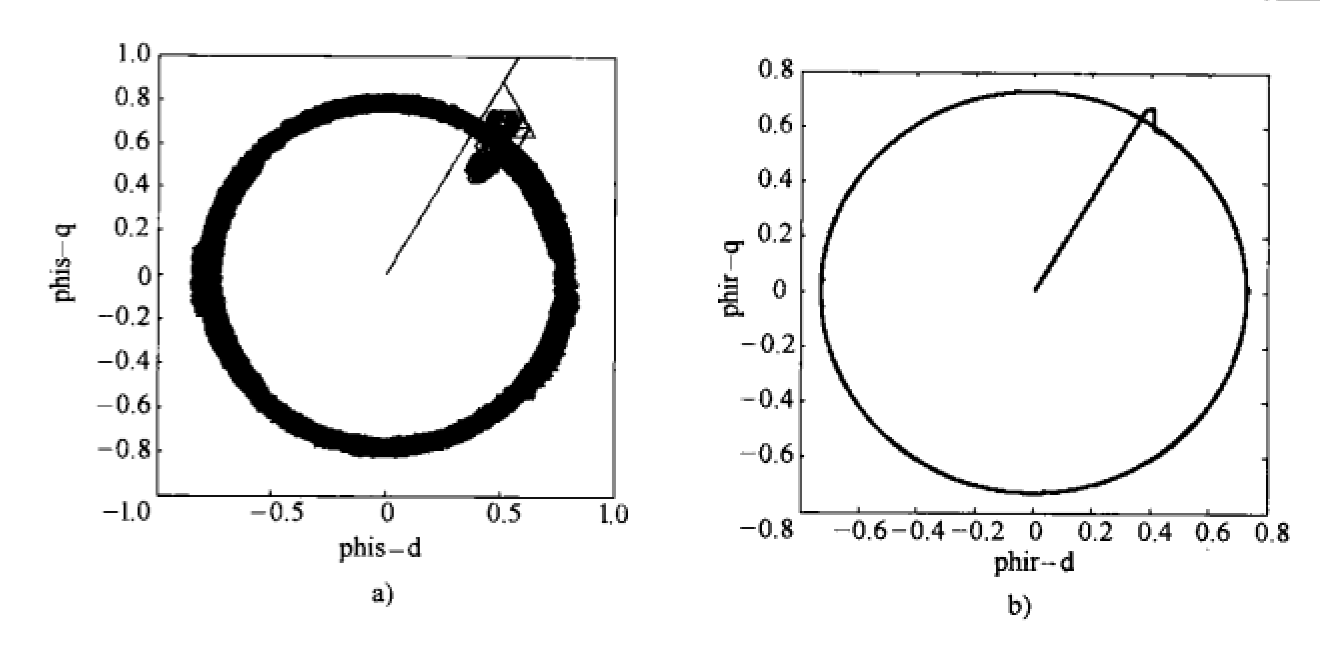


图 8-60　电动机磁链

a）定子磁链轨迹　b）转子磁链轨迹

8.5　三相异步电动机直接转矩控制系统

三相异步电动机直接转矩控制系统模块图标如图 8-61 所示，其仿真模型如图 8-62 所示，模型由 7 个主要模块组成：三相不控整流器（Three-phase diode rectifier）、Braking chopper、三相逆变器（Three-phase inverter）、测量单元（Measures）、异步电动机模块（Induction machine）组成系统主电路；转速控制器（Speed Controller）和直接转矩控制模块 DTC，其中主电路模块和转速控制器模块结构基本与磁场定向矢量控制系统相同，这里主要介绍直接转矩控制 DTC 模块。

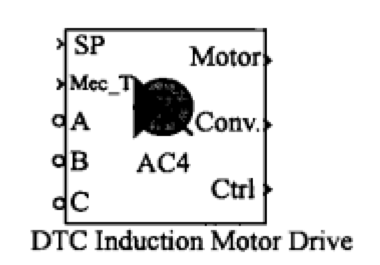


图 8-61　直接转矩控制系统图标

直接转矩控制 DTC 模块结构如图 8-63 所示，转矩给定 Torque*、磁通给定 Flux*、电流 I_ab 和电压 V_abc 输入信号都经过采样开关，DTC 模块包括转矩和磁通计算（Torque & Flux calculator）、滞环控制（Flux & Torque hystere-

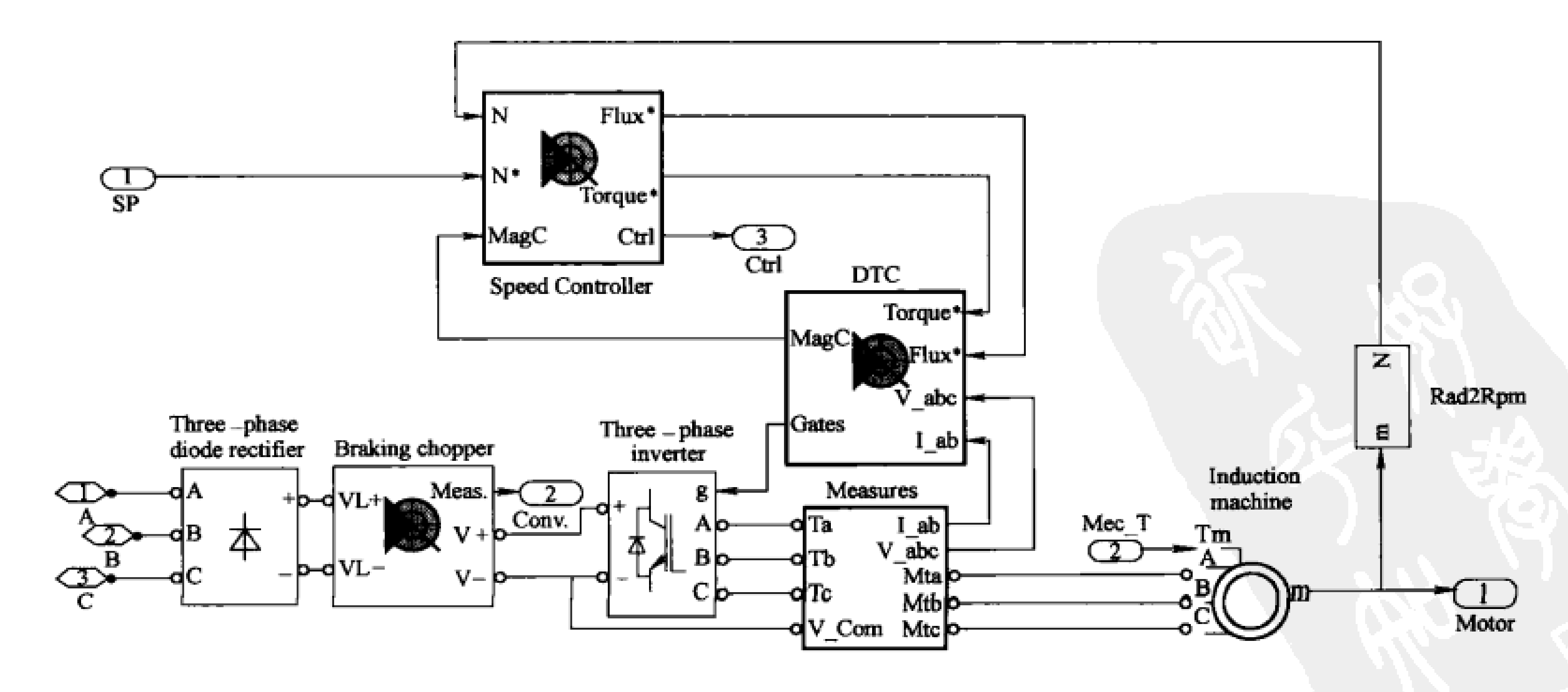


图 8-62　直接转矩控制系统模型结构

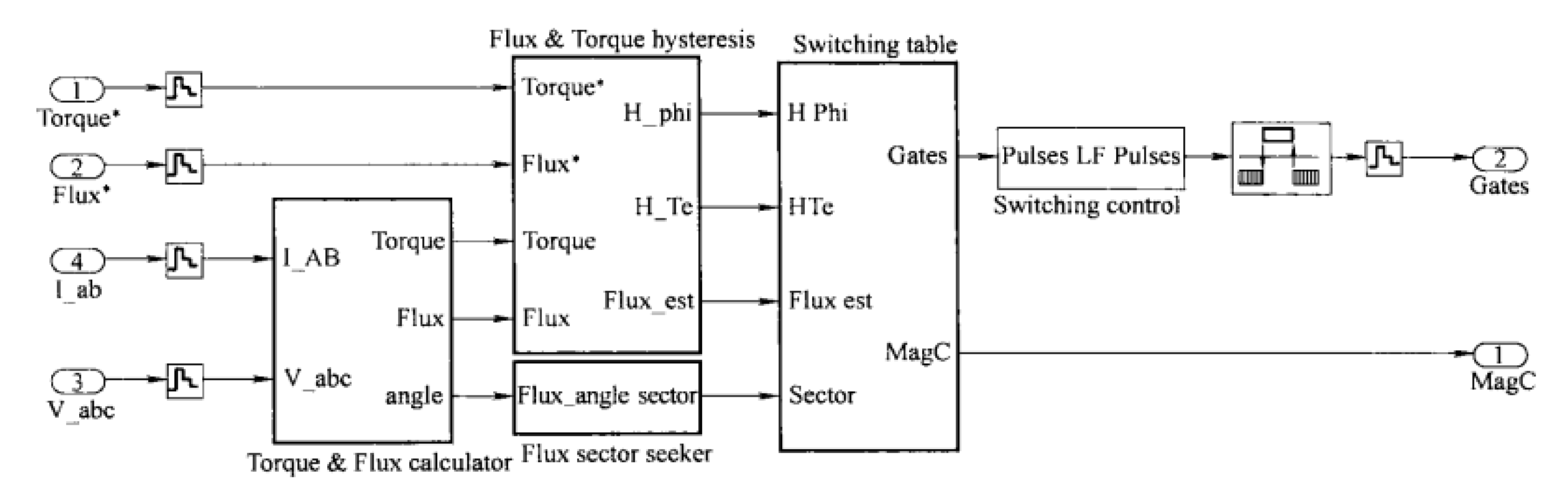


图 8-63　直接转矩控制模块结构

sis)、磁通选择（Flux sector seeker）、开关表（Switching table）、开关控制（Switching control）等单元。DTC 模块输出是三相逆变器 Three-phase inverter 开关器件的驱动信号。

直接转矩控制系统采用 6 个开关器件组成的桥式三相逆变器（Three-phase inverter），该逆变器有 8 种开关状态，可以得到 6 个互差 60°的电压空间矢量和两个零矢量。交流电动机定子磁链 Ψ_s 受电压空间矢量 u_s 控制，$\Psi_s \approx \int u_s \mathrm{d}t$，因此改变逆变器开关状态可以控制定子磁链 Ψ_s 的运行轨迹（磁链的幅值和旋转速度），从而控制交流电动机的运行。

8.5.1　转矩和定子磁链计算

转矩和定子磁链计算（Torque & Flux calculator）单元结构如图 8-64 所示，它首先将检测到的异步电动机三相电压 V_abc 和电流 I_AB 经模块 dq_V_transform 和 dq_I_transform 变换，得到二相坐标系（αβ）上的电压和电流，dq_V_transform 和 dq_I_transform 变换模块结构如图 8-65 所示。

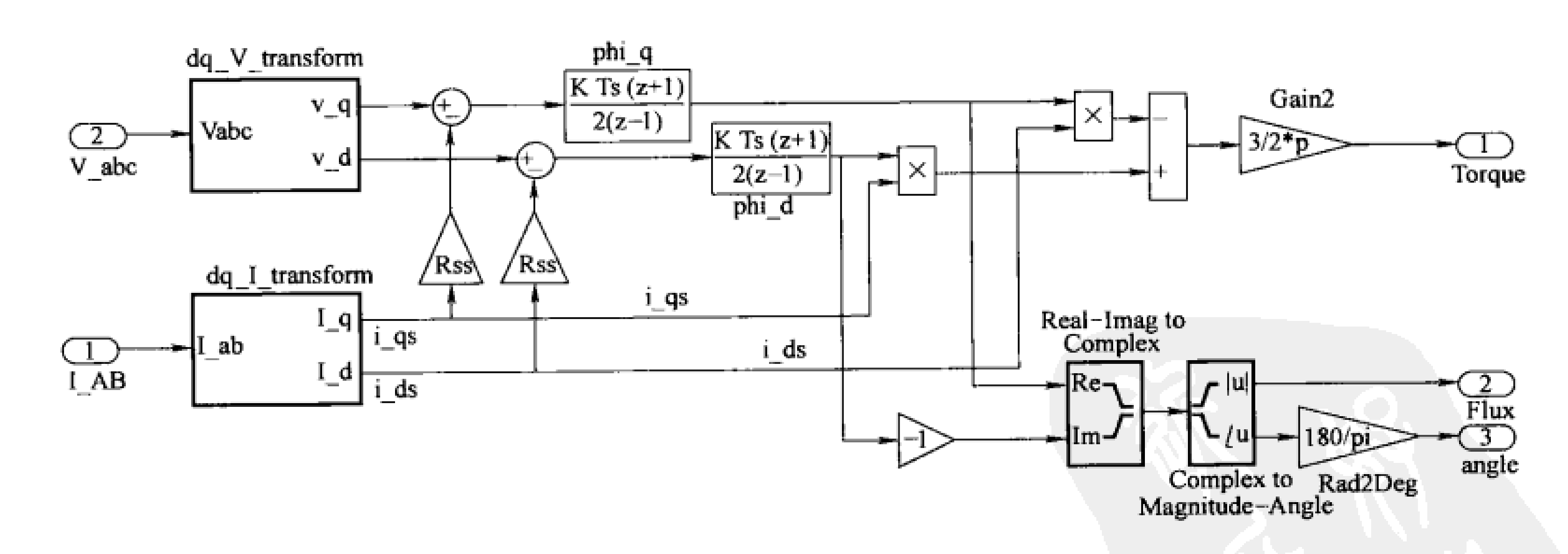


图 8-64　转矩和定子磁链计算单元结构

1. 定子磁链计算

定子磁链的模拟和离散计算式为

$$\Psi_{s\alpha\beta} = \int (u_{s\alpha\beta} - R_s i_{s\alpha\beta}) \mathrm{d}t$$

$$\Psi_{s\alpha\beta} = (u_{s\alpha\beta} - R_s i_{s\alpha\beta})\frac{KT_s(z+1)}{2(z-1)}$$

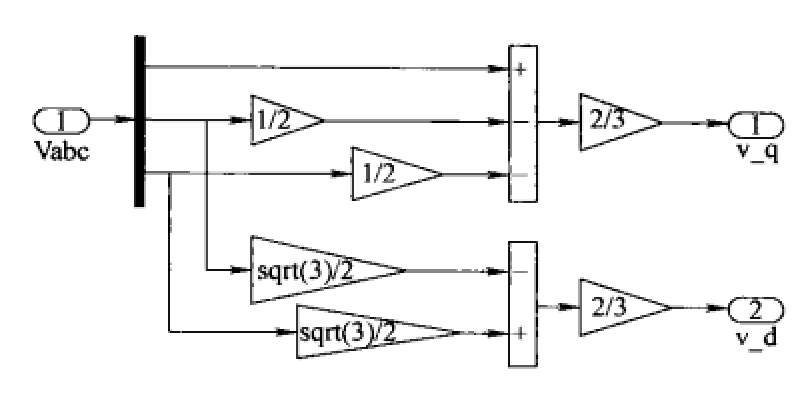


图 8-65　abc/αβ 坐标系变换模块结构

式中，$u_{s\alpha\beta}$和 $i_{s\alpha\beta}$为 αβ 两相坐标系上的定子电压和电流，K 为积分系数，T_s 为采样时间。

磁链计算采用离散梯形积分，模块 phi_d 和 phi_q 分别输出定子磁链的 α 和 β 轴分量 $\Psi_{s\alpha}$和 $\Psi_{s\beta}$，$\Psi_{s\alpha}$ 和 $\Psi_{s\beta}$ 经 Real-Imag to Complex 模块得到复数形式表示的定子磁链 Ψ_s，并由 Complex to Magnitude-Angle 计算定子磁链 Ψ_s的幅值和转角。

2. 转矩计算

电动机转矩计算式为

$$T_e = \frac{3}{2}p(\Psi_{s\beta}i_{s\alpha} - \Psi_{s\alpha}i_{s\beta})$$

式中，p 为电动机极对数。

8.5.2　磁通和转矩滞环控制器

电动机的转矩和磁链都采用滞环控制，磁通和转矩滞环控制器（Flux & Torque hystoresis）结构如图 8-66 所示。转矩控制是三位滞环控制方式，在转矩滞环宽度设为 dT_e时，当转矩偏差$(T_e^* - T_e) > +\frac{dT_e}{2}$和$(T_e^* - T_e) < -\frac{dT_e}{2}$时，滞环模块 $dT_e/2$ 和$-dT_e/2$ 分别输出状态“1”和“3”，当滞环模块 $dT_e/2$ 和$-dT_e/2$ 输出为“0”时，经或非门 NOR 输出状态“2”。磁链控制是二位滞环控制方式，在磁链滞环宽度设为 $d\Psi$ 时，当磁链偏差$(\Psi_e^* - \Psi_e) > +\frac{d\Psi}{2}$和$(\Psi_e^* - \Psi_e) < -\frac{d\Psi}{2}$时，模块 dPhi 分别输出状态“1”和“2”。

8.5.3　磁链选择器

直接转矩控制将磁链空间划分为 6 个区间（见图 8-67），磁链选择器模块（Flux sector seeker 根据定子磁链）Ψ_s 的位置角 φ，判断磁链 Ψ_s 运行在哪一个分区。磁链选择器（Flux

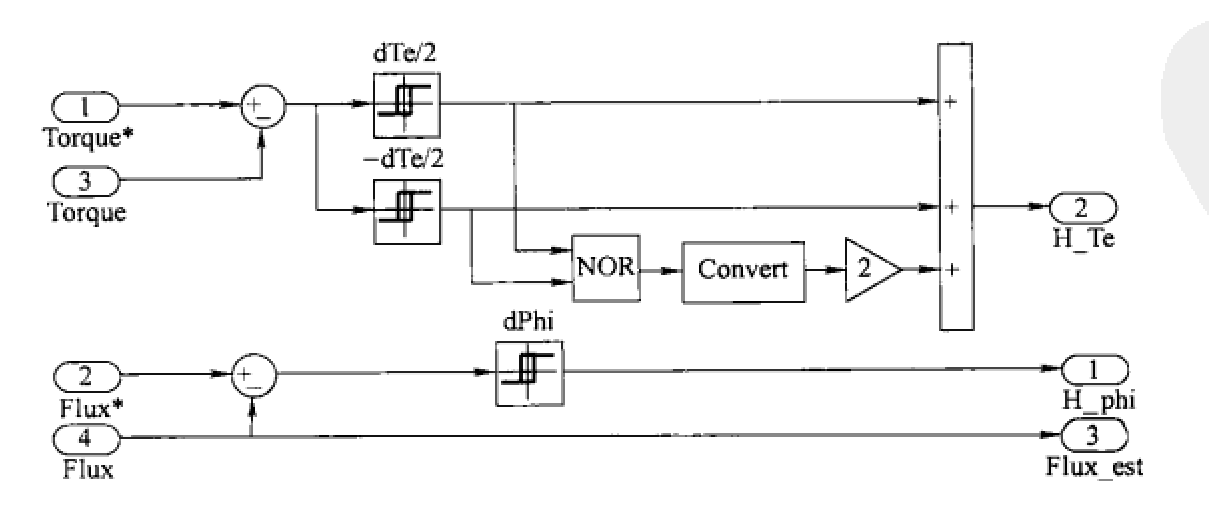


图 8-66　Flux & Torque Hysteresis 模块

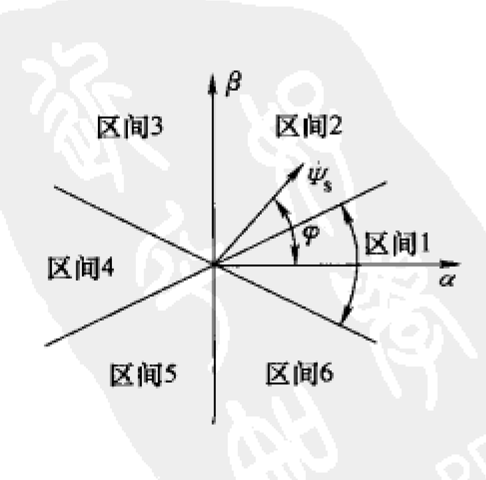


图 8-67　磁链矢量空间

sector seeker）结构如图 8-68 所示，模块输入是磁链计算模块输出的磁链位置角 angle，通过比较和逻辑运算输出磁链所在分区编号。

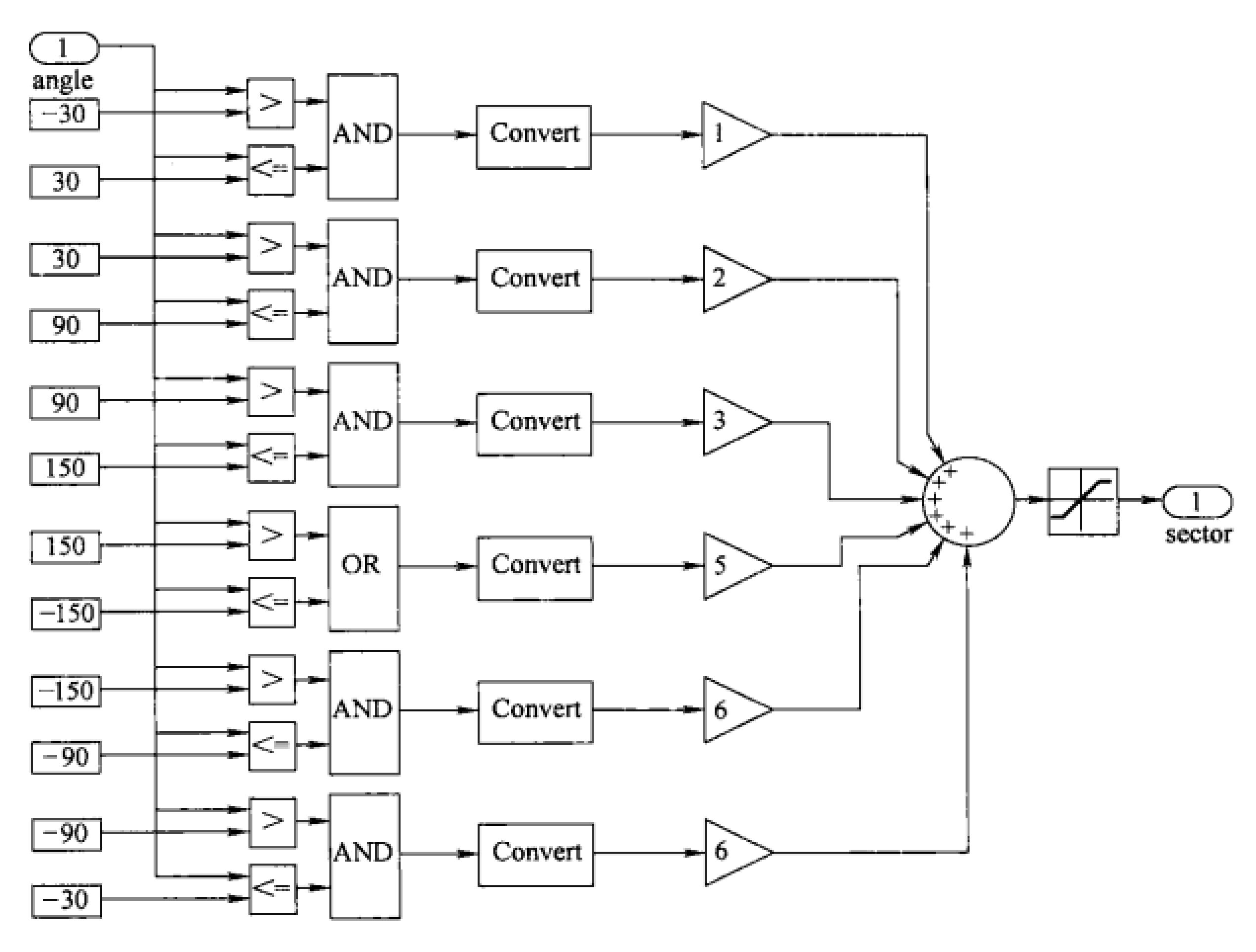


图 8-68　Flux sector seeker 模块结构

8.5.4　开关表

开关表（Switching table）（见图 8-69）用于得到三相逆变器 6 个开关器件的通断状态，它由两张 Lookup Table（2-D）表格（Flux = 1 和 Flux = −1）和三个多路选择器组成。两张 Lookup Table（2-D）表格对应的输出见表 8-9。表格输出加 1 后通过选择开关 2（Multiport Switch2）输出对应的 6 个开关器件的 8 种开关状态 V0 ~ V7，其中包含了两种零状态 V0 和 V7。

表 8-9　Lookup Table（2-D）表格

H phi 状态	H Te 状态	磁链选择器状态 Flux sector seeker					
		1	2	3	4	5	6
1 （表格 Flux = 1）	1	2	3	4	5	6	1
	2	0	7	0	7	0	7
	3	6	1	2	3	4	5
2 （表格 Flux = −1）	1	3	4	5	6	1	2
	2	7	0	7	0	7	0
	3	5	6	1	2	2	4

开关表中，Magnetisation 模块结构如图 8-70 所示，其作用是将磁链反馈值（Flux est）（见图 8-66）与设定值（in_flux）比较，当反馈值大于设定值时，S-R flip-flop 触发器 Q 端

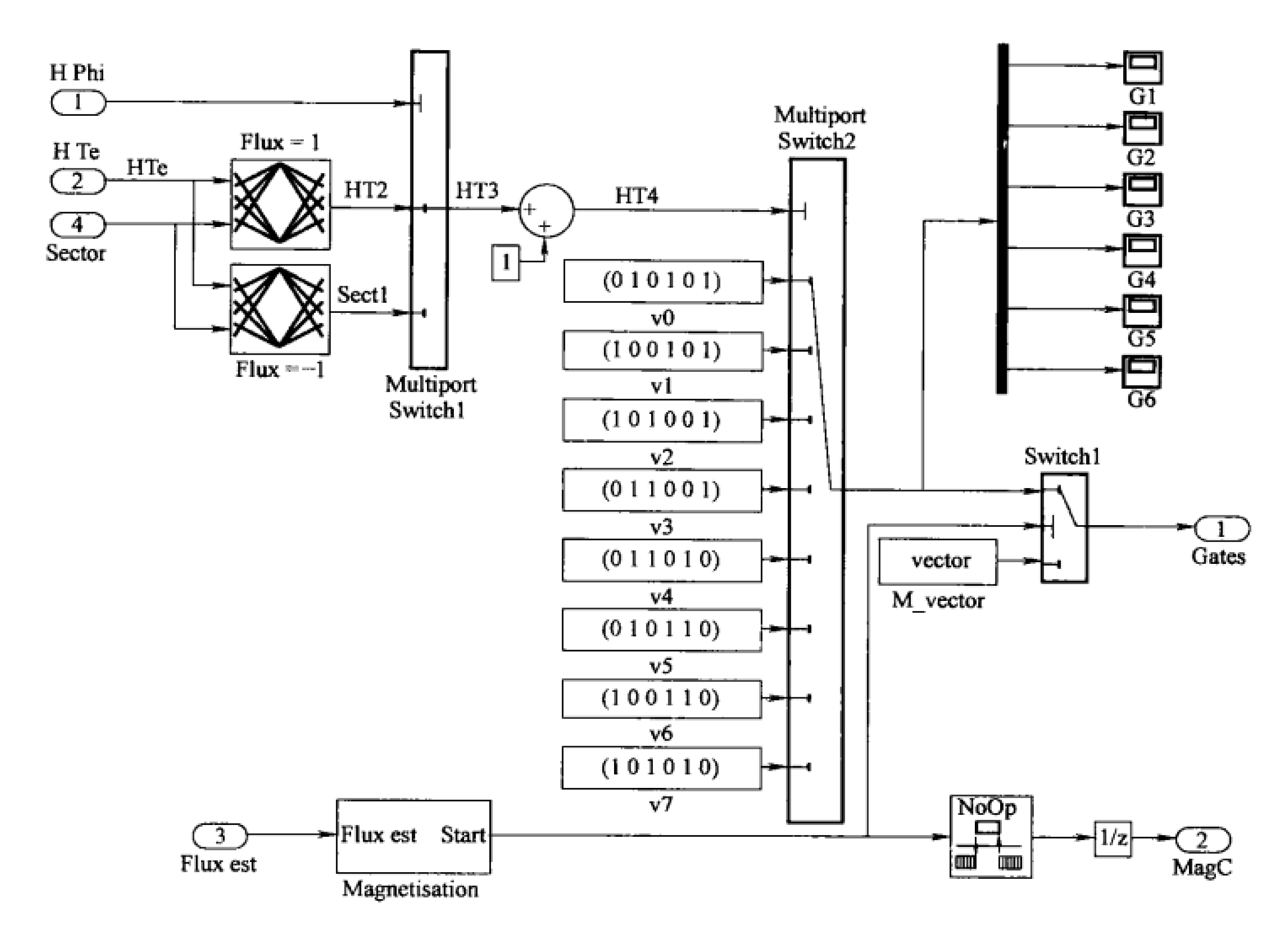


图 8-69　Switching table 开关表

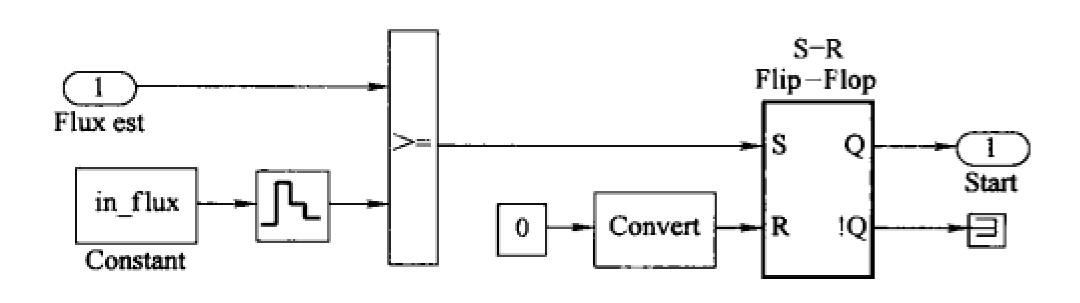


图 8-70　Magnetisation 模块

输出“1”，当反馈值小于设定值时，S-R flip-flop 触发器 Q 端输出“0”，从而控制电动机起动时逆变器和转速调节器工作状态，使电动机起动时生产初始磁通。

开关表模块各点状态如图 8-71 所示，其中图 8-71a 为各时间点上磁链所在扇区（Flux sector seeker 模块输出），图 8-71b 为 Flux sector seeker 模块滞环控制器的输出状态，图 8-71c ~ f 分别是经查表和多路选择开关（Multiport Switch1）后的输出状态，图 8-71g ~ l 分别是在 HT4 信号控制开关（Multiport Switch2）选择的各时间点上的逆变器 6 个开关的开关状态。

8.5.5　开关控制模块

开关控制模块（Switching control）（见图 8-72）包含了三个 D 触发器（D Flip-Flop），目的是限制逆变器开关的切换频率，并且确保逆变器每相上下两个开关处于相反的工作状态，开关的切换频率可以在模块对话框中设置。

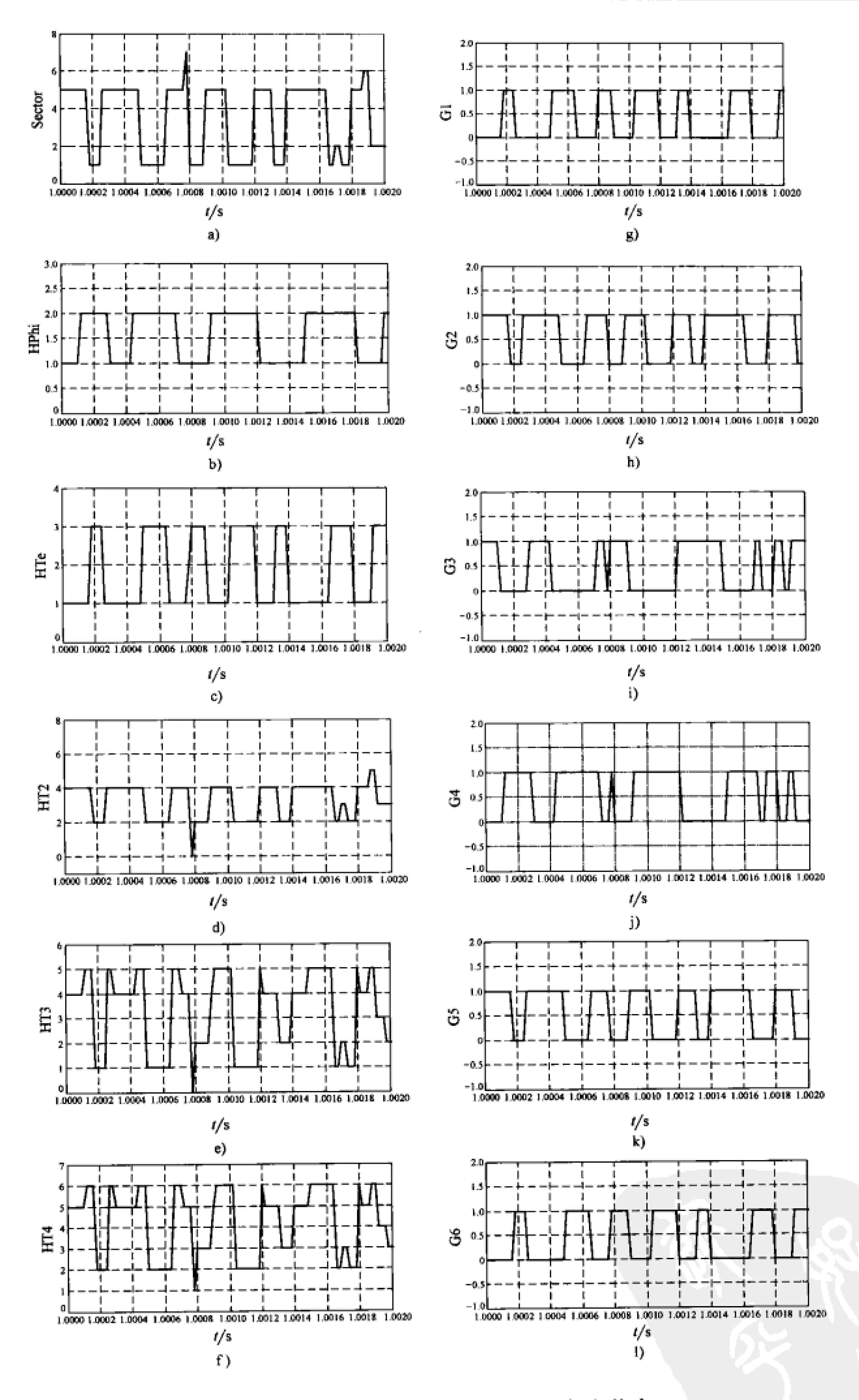


图 8-71 开关表 Switching table 模块各点状态

a) Sector 点状态 b) HPhi 点状态 c) HTe 点状态 d) HT2 点状态 e) HT3 点状态 f) HT4 点状态
g) 逆变器驱动信号 G1 h) 逆变器驱动信号 G2 i) 逆变器驱动信号 G3 j) 逆变器驱动信号 G4
k) 逆变器驱动信号 G5 l) 逆变器驱动信号 G6

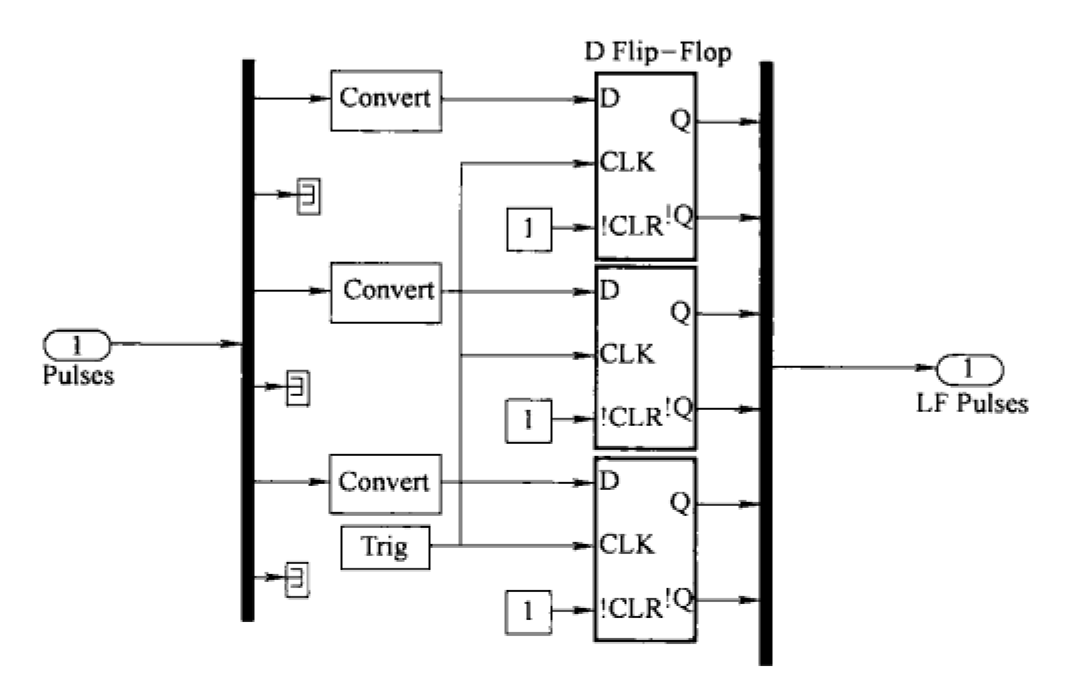


图 8-72　Switching control 模块

8.5.6　模块应用举例 AC4

异步电动机直接转矩控制系统仿真模型如图 8-73 所示，系统由三相交流电源、直接转矩系统模块和检测单元等模块组成。三相电源线电压 360V、60HZ，电源内阻 0.02Ω，电感 0.05mH。电动机额定参数：149kW、460V、60Hz，图 8-74 为直接转矩系统模块 DTC induction motor Drive 的电动机和控制器参数页。系统有转速（Speed reference）和转矩（Torque reference）两项输入，在调速的同时负载转矩也在变化。转速和转矩给定使用离散控制模型库 Discrete Control Blocks 中的 timer 模块，Speed reference 设定值为：$t=0$、1s 时转速分别为 500、0r/min。Torque reference 设定值为：$t=0$、0.5、1.5s 时转矩分别为 0、792、－792N·m。模型采用混合步长的离散算法，基本采样时间 $T_s=0.2\mu s$，转速调节器采样时间为 1.4μs。仿真得到的结果如图 8-75 所示。

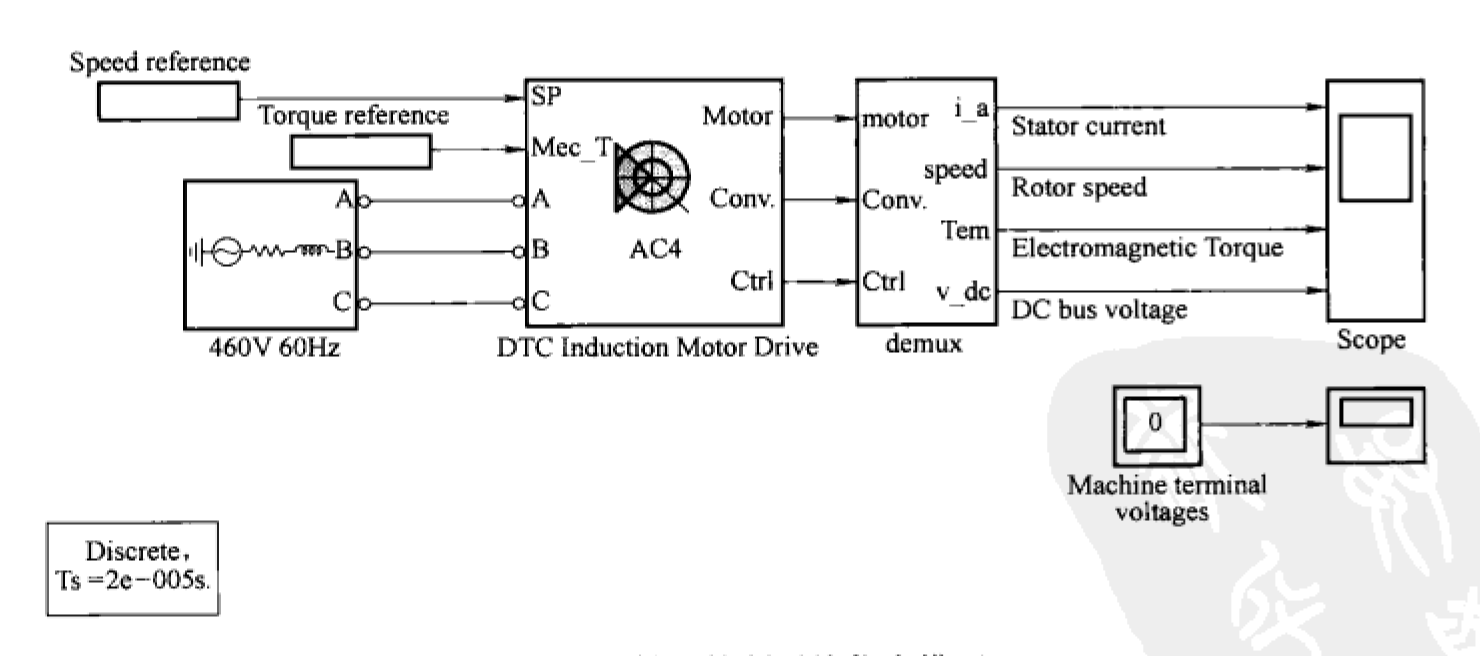


图 8-73　转矩控制系统仿真模型

从仿真波形可以看到在 $t=0$s 时，转速按设定的上升率（900r/min/s）平稳升高，在起动 0.6 s 时达到设定的转速 500r/min。在 0～0.5s 范围内电动机是空载起动，电动机电流为 200A（幅值）；0.5s 时加载 792T·m，电流上升为 400A（幅值），加载时电磁转矩瞬间达到

a)　　　　　　　　b)

图 8-74　模块参数

a）电动机参数　b）DTC 控制器参数

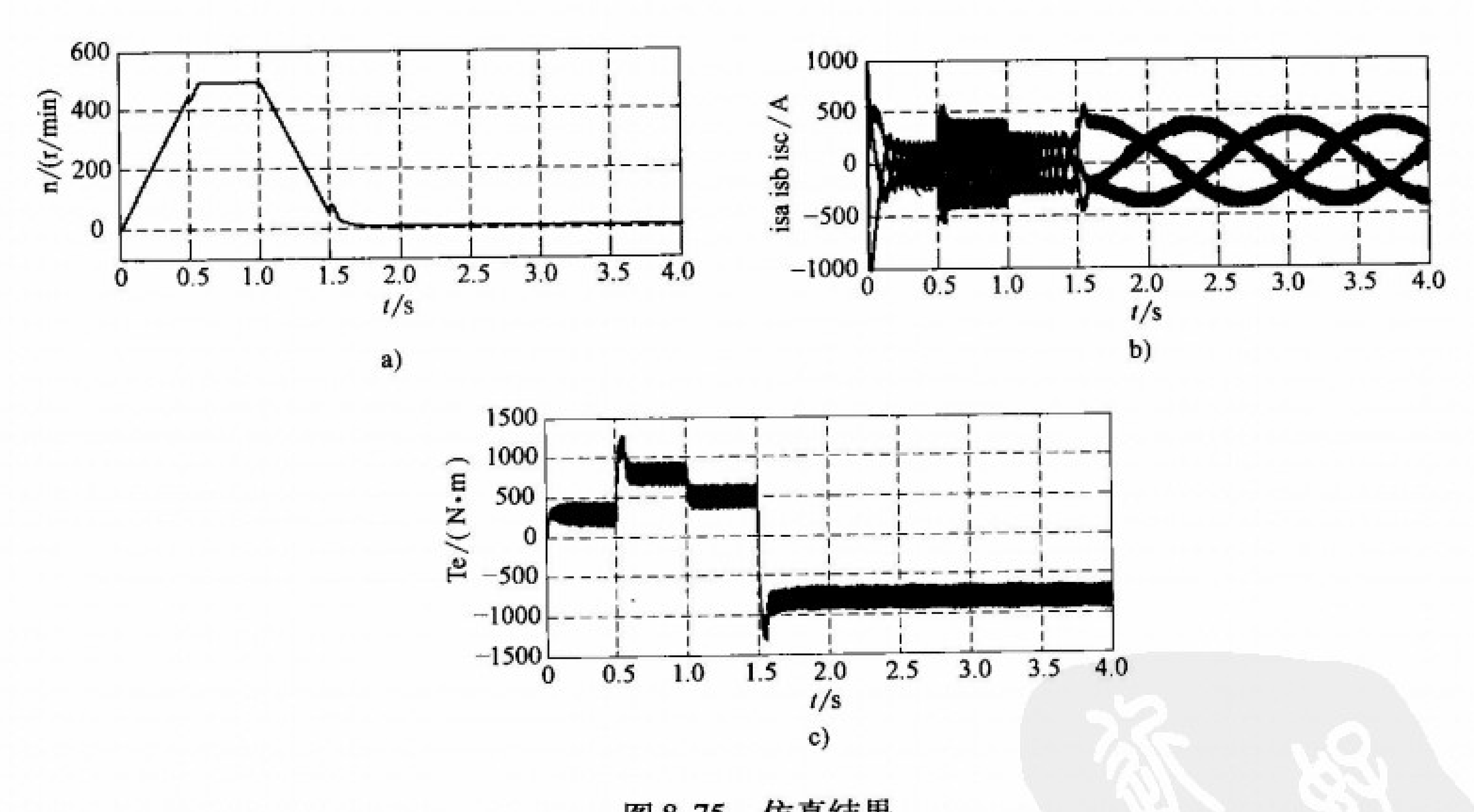


图 8-75　仿真结果

a）转速响应　b）三相定子电流　c）电磁转矩

1200N·m，但是在系统控制下，加载对转速的上升和稳定运行没有明显影响。1s 后电动机开始减速，定子电流减小，并且电流频率下降。在 $t=1.5\mathrm{s}$ 时转速下降为 0，这时转矩给定从 792N·m 变化为 −792N·m，转速仍稳定为 0r/min，表明系统有很好的转矩和速度响应能力。图 8-76 为电动机定子和转子磁链的轨迹，在限制开关频率为 20kHz，磁通波动为 0.2Wb 时，定子和转子的磁链都已经是很好的圆形，使直接转矩控制起到很好的效果。

DIANLI DIANZI、DIANJI KONGZHI XITONG DE JIANMO HE FANGZHEN

ISBN 978-7-111-29137-4
ISBN 978-7-89451-416-5（光盘）
封面设计：鞠杨

地址：北京市百万庄大街22号
电话服务
社服务中心：(010)88361066
销售一部：(010)68326294
销售二部：(010)88379649
读者服务部：(010)68993821

邮政编码：100037
网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

上架指导：工业技术／电力电子

定价：33.00元（含1DVD）

